

UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE Science – Technique – Santé

Faculté des Sciences et Techniques

Année : 2005

Thèse N°: 562005

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Discipline : Chimie et Microbiologie de l'Eau

présentée et soutenue par

Florence CHARNAY

le 28 octobre 2005

**Compostage des déchets urbains dans les Pays en
Développement : élaboration d'une démarche méthodologique
pour une production pérenne de compost**

Thèse dirigée par : Guy MATEJKA

Co-directeur : Serge CHAMBON

JURY :

M. Jean-Claude REVEL :

Professeur, ENSA Toulouse

M. Rémy GOURDON :

Professeur, INSA Lyon

M. Michel BAUDU :

Professeur, Université de Limoges

M. Serge CHAMBON :

Maître de conférences, Université de Limoges

M. Bernard FOULLY :

Ingénieur Ademe, Pays tiers, Paris

M. Guy MATEJKA :

Professeur, Université de Limoges

M. Bernard MORVAN :

Ingénieur de Recherche, Cemagref de Rennes

UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE Science – Technique – Santé

Faculté des Sciences et Techniques

Année : 2005

Thèse N°: 562005

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Discipline : Chimie et Microbiologie de l'Eau

présentée et soutenue par

Florence CHARNAY

le 28 octobre 2005

**Compostage des déchets urbains dans les Pays en
Développement : élaboration d'une démarche méthodologique
pour une production pérenne de compost**

Thèse dirigée par : Guy MATEJKA

Co-directeur : Serge CHAMBON

JURY :

M. Jean-Claude REVEL :

Professeur, ENSA Toulouse

M. Rémy GOURDON :

Professeur, INSA Lyon

M. Michel BAUDU :

Professeur, Université de Limoges

M. Serge CHAMBON :

Maître de conférences, Université de Limoges

M. Bernard FOULLY :

Ingénieur Ademe, Pays tiers, Paris

M. Guy MATEJKA :

Professeur, Université de Limoges

M. Bernard MORVAN :

Ingénieur de Recherche, Cemagref de Rennes

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire des Sciences de l'Eau et de l'Environnement (LSEE) de Limoges. J'exprime ma reconnaissance au Professeur Michel BAUDU pour la confiance qu'il m'a témoignée en m'accueillant au sein de son laboratoire pendant ces années de recherche.

Je remercie profondément Monsieur Guy MATEJKA, Professeur de l'Université de Limoges pour avoir dirigé ce travail et pour l'intérêt constant qu'il a porté à ce sujet de recherche. Je souhaiterais ici lui témoigner ma sincère reconnaissance pour tous les conseils et les remarques objectives qu'il m'a apportés.

Je tiens également à remercier Monsieur Serge CHAMBON, Maître de Conférences à l'Université de Limoges pour sa disponibilité, ses orientations et ses remarques fructueuses. Qu'il trouve ici ma profonde gratitude.

Je suis très sensible à l'honneur que m'ont fait Messieurs Remy GOURDON, Professeur à Institut National des Sciences Appliqués (INSA) de Lyon, et Jean-Claude REVEL, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA) de Toulouse, pour m'avoir honoré de leur présence en acceptant d'être rapporteurs de ce travail et de le juger.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs Bernard FOULLY, Ingénieur à l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) à la direction internationale, pays tiers, et Monsieur Bernard MORVAN, Ingénieur de Recherche au Cemagref de Rennes pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail en acceptant de le juger.

Je tiens également à remercier l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et le Conseil Régional pour leur soutien financier.

Je n'oublie pas tous les membres du Laboratoire des Sciences de l'Eau et de l'Environnement et l'équipe de joyeux lurons de l'Ecole National Supérieure d'Ingénieurs de Limoges (ENSIL) avec qui j'ai partagé les bons comme les mauvais moments et qui m'ont permis de trouver une deuxième famille...

Je ne pourrai terminer ces remerciements sans y associer ma famille et mes amis qui m'ont toujours apporté tout leur soutien et leur appui afin d'arriver au terme de cette aventure ...Et tous ceux rencontrés durant ces 4 années sans le soutien desquels je n'aurai pu entreprendre ces études. A toutes et à tous je leur dis un grand merci !

Glossaire et abréviations

A.F : Acide Fulvique

A.H : Acide Humique

A.V : Apport Volontaire

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (France)

AFNOR : Association Française de NORmalisation

AZOTE KJELDAHL : Représente la somme de l'azote organique et de l'azote ammoniacal (NH_4^+)

BILCO® : Logiciel de traitement informatique

B.R.G.M : Bureau de Recherche Géologique et Minières

C.E.C : Capacité d'Echange Cationique

C.E.M.A.G.R.E.F : CEntre national du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et des Forêts

D.M.S : Déchets Ménagers Spéciaux

F.F.O.M : Fraction fermentescible des ordures ménagère

FILIERE DE COMPOSTAGE : Chaîne de traitement des déchets par la voie du compostage comprenant la collecte, le traitement et la valorisation du compost

FINES : Particules de petites tailles définis en fonction de l'analyse soit <20 mm soit < 8 mm

H% : Pourcentage d'Humidité

INERTES : Matières sans aucune réactivité biologique ou chimique

M.O : Matière Organique

M.O.T% : Pourcentage de Matière Organique Totale

M.S% : Pourcentage de Matière Sèche

METAUX LOURDS : Les plus fréquemment rencontrés sont : le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le plomb (Pb) et le zinc (Zn)

MODECOM© : Mode de caractérisation des ordures ménagères

O.M : Ordures ménagères

O.N.G : Organisation Non Gouvernementale

P.A.P : Porte A Porte

P.C.I : Pouvoir Calorifique Inférieur

P.E.D : Pays en développement dont le PIB est inférieur à 825 \$US/hab. selon la banque mondiale.

P.I : Pays Industrialisés

P.I.B : Produit Intérieur brut, exprimé en dollar US par habitant

RAPPORT C/N : rapport Carbone organique/ Azote kjeldhal

TOXICITE : Aptitude d'une substance à être nocive pour un organisme vivant

Sommaire

<i>Préambule</i>	<i>1</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>3</i>
<i>Partie I : Analyse bibliographique</i>	<i>9</i>
<i>Chapitre 1 : Gestion des déchets urbains dans les P.E.D</i>	<i>11</i>
I. Caractérisation du gisement	12
I.1. Terminologie et classification	12
I.2. Quantité de déchets urbains produits.....	12
I.3. Composition des déchets urbains	13
I.3.1. Méthode de caractérisation des déchets urbains	14
I.3.2. Caractérisation des déchets urbains	14
I.3.3. Composition physico-chimique des déchets urbains	16
II. Cadre institutionnel de la gestion des déchets urbains	18
II.1. Acteurs	18
II.2. Cadre réglementaire	20
II.3. Types de gestion : exemples dans les P.E.D	20
II.3.1. Gestion directe en régie.....	20
II.3.2. Gestion déléguée	21
II.3.3. Gestion communautaire	21
III. Collecte	22
III.1. Taux de collecte.....	22
III.2. Mode de collecte.....	23
III.2.1. Pré-collecte par moyens légers	24
III.2.2. Apport volontaire en containers	24
III.2.3. Porte à porte par moyens lourds.....	24
III.3. Moyens de transport	25
III.4. Coût de la collecte	26
IV. Traitements	27
IV.1. Mise en décharge.....	27
IV.2. Valorisation	27
IV.2.1. Réemploi et recyclage	27
IV.2.2. Compostage	28
IV.3. Incinération.....	28
IV.4. Comparaison des traitements.....	28

Chapitre 2 : Généralités sur le compostage..... 31

I. Généralités	32
I.1. Définition	32
I.2. Avantages du compost	32
II. Principaux paramètres du compostage.....	33
II.1. Micro-organismes	34
II.2. Paramètres physico-chimiques.....	34
II.2.1. pH.....	34
II.2.2. Température	35
II.2.3. Teneur en humidité	35
II.2.4. Rapport Carbone/Azote.....	36
II.2.5. Teneur en Matière Organique Totale	37
II.2.6. Apport d'oxygène.....	37
II.2.7. Granulométrie	38
III. Qualité du compost.....	39
III.1. Maturité et stabilité du compost	39
III.2. Indicateurs de maturité	40
III.2.1. Indicateurs physiques.....	41
III.2.2. Indicateurs chimiques	41
III.2.3. Indicateurs biologiques	42
III.3. Teneur en métaux	46
III.4. Valeurs agronomiques	48

Chapitre 3 : Procédés de compostage dans les P.E.D..... 51

I. Différentes étapes du compostage	52
I.1. Préparation du substrat	52
I.1.1. Tri.....	53
I.1.2. Broyage	53
I.2. Fermentation	54
I.3. Maturation.....	54
I.4. Mise en forme du produit pour la commercialisation.....	54
I.4.1. Criblage	54
I.4.2. Conditionnement et stockage.....	55
II. Techniques de fermentation.....	55
II.1. Fermentation en andain.....	56
II.2. Fermentation accélérée en réacteur horizontal.....	57
II.3. Fermentation accélérée en réacteur vertical	58
II.4. Fermentation accélérée en tube rotatif	58

II.4.1. Exemple du procédé « Biologic Reactor Stabilisation » (BRS®)	58
II.4.2. Exemple du procédé Dano®	59
II.5. Autres types de fermentation	59
III. Bilan dans les P.E.D	60
III.1. Conditions et problèmes spécifiques aux P.E.D	60
III.2. Bilan des procédés dans les P.E.D.....	60
<i>Chapitre 4 : Analyse de la filière compostage des P.E.D.....</i>	<i>65</i>
I. Aspect « technologique » du procédé.....	66
II. Aspect commercialisation du compost	68
III. Aspect politique	69
IV. Aspect financier et économique.....	70
V. Complément sur l'analyse bibliographique.....	71
<i>Conclusion de l'analyse bibliographique</i>	<i>73</i>
<i>Partie II : Méthodes et moyens d'analyse</i>	<i>77</i>
<i>Chapitre 1 : Mise en place des outils d'évaluation et descriptions des sites d'étude</i>	<i>79</i>
I. Réalisation d'une base de données.....	80
II. Elaboration de la méthodologie	80
II.1. Questionnaires complémentaires	81
II.2. Indicateurs de fonctionnement	81
II.2.1. Choix des indicateurs	81
II.2.2. Hiérarchisation des indicateurs	83
II.3. Choix des sites industriels de compostage dans les P.E.D.....	84
II.3.1. Classification.....	84
II.3.2. Critères de sélection	85
III. Description des sites d'étude	86
III.1. Site industriel A de déchets verts en France	86
III.2. Site industriel B en Afrique du Nord	87
III.2.1. Gestion des déchets urbains	87
III.2.2. Description de l'usine B	88
III.3. Site informel C en Afrique de l'Ouest	90
III.3.1. Gestion des déchets urbains	90
III.3.2. Description de la plate-forme de compostage expérimentale	91
IV. Comparaison	92

Chapitre 2 : Matériels et méthodes analytiques 93

I. Echantillonnage 94

- I.1. Prélèvement des déchets urbains 94
- I.2. Produits et refus avant la fermentation en andain 94
- I.3. Produits et refus pendant et après la mise en andain 94
- I.4. Conservation des échantillons 95

II. Techniques analytiques 95

- II.1. Analyses physiques 95
 - II.1.1. Bilan pondéral 95
 - II.1.2. Température 96
 - II.1.3. Densité apparente 96
 - II.1.4. Caractérisation 96
 - II.1.5. Inertes 98
- II.2. Analyses chimiques 99
 - II.2.1. pH 99
 - II.2.2. Humidité et matière sèche 99
 - II.2.3. Mesure de la teneur en matière organique 100
 - II.2.4. Carbone 101
 - II.2.5. Teneur en azote 102
 - II.2.6. Rapport C/N 103
 - II.2.7. Méthode de détermination de la teneur en métaux 103
 - II.2.8. Autres 103
- II.3. Analyses biologiques 103
 - II.3.1. Tests de maturité 103
 - II.3.2. Tests de respirométrie 105
- II.4. Traitement informatique des données 106
 - II.4.1. Etude statistique des résultats 106
 - II.4.2. Logiciel Bilco® 107

Partie III : Résultats et discussions 109

Chapitre 1 : Elaboration des outils méthodologiques 111

I. Mise au point des supports de la méthodologie 112

- I.1. Prise de contact 112
- I.2. Questionnaires 113
- I.3. Cahier de protocoles et de méthodes analytiques 114
- I.4. Support d'expertise 116
- I.5. Cahier de recommandations 116

II. Mise au point des méthodes analytiques 117

II.1. Humidité	117
II.1.1. Efficacité de la thermo-balance.....	117
II.1.2. Comparaison des températures de séchage	119
II.2. Matière organique totale	120
II.3. Evaluation de la maturité	122
II.3.1. Méthode de DBO adaptée	122
II.3.2. Comparaison avec des méthodes d'évaluation de la production de CO ₂	131
II.3.3. Comparaison des tests de maturité	132
II.3.4. Conclusion sur la méthode respirométrique DBO.....	134
Chapitre 2 : Validation sur le site A	135
I. Suivi et contrôle du procédé	136
I.1. Historique.....	136
I.2. Suivi du procédé.....	137
I.3. Qualité du compost	139
I.4. Débouchés du compost produit	139
II. Impacts environnementaux.....	140
III. Répartition des coûts d'exploitation	141
IV. Exploitations et mesures correctives.....	142
IV.1. Questionnaires	143
IV.2. Supports d'expertise	143
IV.3. Rassemblement des informations et fiabilité.....	144
IV.4. Réalisation des analyses	144
Chapitre 3 : Application de la méthodologie sur le site B	149
I. Organisation de l'expertise expérimentale.....	150
I.1. Prise de contact	150
I.2. Analyse des réponses aux questionnaires.....	150
I.3. Planification des actions sur place.....	150
I.4. Préparation de la chaîne de compostage.....	151
II. Application de la méthodologie.....	151
II.1. Bilan pondéral.....	152
II.2. Bilan massique des matériaux séparés	154
II.3. Caractérisation des déchets	155
II.3.1. Echantillonnage.....	155
II.3.2. Comparaison des résultats obtenus avec les deux types de caractérisation.....	156
II.3.3. Evolution de la granulométrie	157
II.3.4. Evolution granulométrique par catégorie	158
II.3.5. Répartition par catégories de déchets	161

II.4. Densité	163
II.5. Suivi de l'humidité.....	164
II.6. Evolution des paramètres principaux	166
II.6.1. Matière organique totale par perte au feu.....	166
II.6.2. Rapport Carbone / Azote.....	167
II.6.3. Concentration en sel NaCl.....	168
II.6.4. Métaux lourds	168
II.6.5. Evolution de la teneurs en inertes dans les fines < 20 mm.....	170
II.6.6. Validité des résultats	171
III. Qualité du compost.....	173
III.1. Paramètres globaux.....	173
III.2. Evolution de l'azote.....	174
III.3. Test simplifié d'évaluation de la maturité	174
III.4. Tests Cresson.....	175
III.5. Aspect bactériologique des composts	176
III.6. Qualité agronomique des composts produits	177
IV. Contrôle des lixiviats	177
V. Bilan matière sur les opérations unitaires.....	178
V.1. Efficacité du tri	178
V.2. Performance du tube rotatif de maille 55 mm.....	179
V.3. Importance des poulies magnétiques de déferrailage	181
V.4. Efficacité de la table vibrante de maille 14 mm.....	181
VI. Préconisations suite à l'étude.....	182
VI.1. Option 1 : optimisation des différentes étapes.....	183
VI.2. Option 2 : propositions de modification de chaîne de traitement	184
Chapitre 4 : Proposition d'une méthodologie générale	187
I. Expertise du procédé technologique de compostage	188
I.1. Objectifs	188
I.2. Planification des actions.....	189
I.3. Evaluation technique du procédé	189
I.3.1. Supports écrits d'expertise.....	189
I.3.2. Schéma du procédé industriel.....	190
I.3.3. Bilans pondéraux	191
I.3.4. Echantillonnage	191
I.3.5. Caractérisation.....	193
I.3.6. Analyse des paramètres de suivi du procédé	194
I.3.7. Indicateurs de performance	197
I.4. Déroulement de l'expertise	198

I.4.1. Sélection du nombre de personnels nécessaires	198
I.4.2. Choix du jour de démarrage	198
I.4.3. Choix du flux initial.....	199
I.4.4. Sélection des laboratoires extérieurs	199
I.5. Fin de l'expertise : bilan et recommandations.....	199
II. Amont de l'usine : la collecte	199
II.1. Indicateurs de collecte.....	199
II.2. Analyse des performances	200
III. Aval de l'usine : la valorisation du compost	202
III.1. Utilisation du compost : marché traditionnel ou marché de rente	202
III.2. Données agro-pédologiques locales.....	203
III.2.1. Besoins dans la région de la ville C	203
III.2.2. Types de sols.....	203
III.2.3. Caractérisation des cultures	204
III.3. Essais sur parcelles agricoles.....	205
III.4. Résultats agronomique sur compost du site C	206
<i>Conclusion Générale.....</i>	<i>209</i>
<i>Références Bibliographiques</i>	<i>215</i>
<i>Annexes.....</i>	<i>229</i>

Index des tableaux

Tableau 1 : Production de déchets par habitant de plusieurs villes	12
Tableau 2 : Composition des déchets urbains dans plusieurs pays (en % massique).....	15
Tableau 3 : Teneur en eau des déchets urbains	16
Tableau 4 : Caractéristiques chimiques moyennes de plusieurs déchets urbains.....	17
Tableau 5 : Rôles des acteurs de la gestion des déchets.....	19
Tableau 6 : Taux de couverture de la collecte des déchets urbains.....	23
Tableau 7 : Comparaison des modes de collectes des déchets urbains dans les P.E.D.....	25
Tableau 8 : Prix de revient de la collecte	26
Tableau 9 : Comparaison des techniques de traitement des déchets urbains	29
Tableau 10 : Température et durée d'exposition nécessaire à la destruction de pathogènes	35
Tableau 11 : Rapport C/N de divers substrats	36
Tableau 12 : Paramètres de contrôle et de suivi du procédé	38
Tableau 13 : Paramètres de stabilité et de maturité (en % d'apparition dans la littérature).....	40
Tableau 14 : Synthèse bibliographique des principaux indicateurs de maturité.....	46
Tableau 15 : Nombres de classes de compost dans plusieurs pays].....	47
Tableau 16 : Limites normatives en métaux lourds (mg/kg MS) dans les composts	47
Tableau 17 : Teneurs en métaux lourds dans plusieurs composts (mg/kg).....	48
Tableau 18 : Qualité agronomique de plusieurs composts d'ordures ménagères.....	48
Tableau 19 : Fréquence d'apparition à travers la littérature des techniques de compostage dans les P.E.D.....	56
Tableau 20 : Récapitulatif des procédés de fermentation employés dans les P.E.D.....	61
Tableau 21 : Exemples de dysfonctionnements rencontrés dans les P.E.D.....	63
Tableau 22 : Analyse de la revue bibliographique	71
Tableau 23 : Influence des paramètres	84
Tableau 24 : Comparaison des indicateurs socio-économiques	92
Tableau 25 : Exemple de la quantité d'échantillon à trier (Kg)	98
Tableau 26 : Valeurs de l'indice Dewar en fonction de la température maximale atteint.....	104
Tableau 27 : Grille de détermination de l'indice de maturité Solvita® en fonction des indices CO ₂ et NH ₃	104
Tableau 28 : Nomenclature des échantillons prélevés sur la plate-forme de compostage d'ordures ménagères.....	115
Tableau 29 : Résultats des essais comparatifs entre la méthode normée et la thermo-balance.....	117
Tableau 30 : Résultats de la comparaison des températures de séchage	120
Tableau 31 : Résultats comparatifs des essais de détermination de la M.O.T (en %).....	121
Tableau 32 : Facteur de dilution pour utiliser la méthode manométrique.....	123
Tableau 33 : Facteur de dilution appliqué pour la mesure de la DBO avec des Oxytop®.....	128
Tableau 34 : Comparaison des tests de maturité	133
Tableau 35 : Comparaison des différentes méthodes d'évaluation de la maturité	133
Tableau 36 : Bilan matière annuel.....	136
Tableau 37 : Résultats analytiques moyen de la qualité du compost	139
Tableau 38 : Composition des rejets liquides.....	140
Tableau 39 : Support d'expertise modifié	144
Tableau 40 : Récapitulatifs des indicateurs et des préconisations.....	148
Tableau 41 : Bilan pondéral	152
Tableau 42 : Bilan pondéral d'après Bilco® avec le refus d'usine comme inconnue.....	153
Tableau 43 : Natures et quantités de matériaux séparés.....	154
Tableau 44 : Variations quantitatives des prises d'échantillon (Kg).....	155
Tableau 45 : Evolution granulométrique par catégorie (kg).....	159
Tableau 46 : Composition des flux en % calculés par rapport au flux entrant.....	161
Tableau 47 : Evolution de la densité (T/m ³).....	163
Tableau 48 : Comparaison des teneurs en humidité en %	165
Tableau 49 : Teneurs en métaux exprimés en mg/kg de MS.....	169
Tableau 50 : Evolution des sous fractions < 20 mm en %	171
Tableau 51 : Projet de révision de la norme NFU 44-051.....	171

Tableau 52 : Pourcentage d'erreurs sur les paramètres physico-chimique entre la caractérisation sur matière sèche et sur matière humide	172
Tableau 53 : Résultats des tests Solvita®.....	175
Tableau 54 : Moyenne des résultats du test de germination du cresson.....	176
Tableau 55 : Aspect bactériologique du compost et refus de criblage	176
Tableau 56 : Evolution de la qualité agronomique du compost	177
Tableau 57 : Composition du lixiviat.....	178
Tableau 58 : Débit matière au niveau du tri	179
Tableau 59 : Débit matière du tube rotatif de type Dano®	180
Tableau 60 : Débit matière des poulies magnétiques de déferrailage	181
Tableau 61 : Débit matière de la table vibrante.....	182
Tableau 62 : Récapitulatifs de l'étude sur le site B	183
Tableau 63 : Objectifs de l'expertise.....	188
Tableau 64 : Schéma général d'un procédé de compostage.....	190
Tableau 65 : Identification des évaluations à réaliser pour d'éventuels problèmes	190
Tableau 66 : Poids d'échantillons à prélever et séchage à réaliser.....	192
Tableau 67 : Types de caractérisation	193
Tableau 68 : Paramètres physiques à mesurer pendant l'expertise	194
Tableau 69 : Paramètres chimiques à mesurer sur solide pendant l'expertise	195
Tableau 70 : Paramètres chimiques sur les lixiviats.....	196
Tableau 71 : Paramètres chimiques mesurés sur le compost pendant l'expertise	197
Tableau 72 : Indicateurs de performance	198
Tableau 73 : Besoin en personnel et en temps	198
Tableau 74 : Indicateurs de collecte du site A.....	200
Tableau 75 : Besoins en fertilisants dans la région	203
Tableau 76 : Types de cultures.....	204
Tableau 77 : Résultats des essais agronomiques	206

Index des figures

Figure 1 : Schéma mettant en évidence la complexité de la filière compostage	8
Figure 2 : Processus de compostage.....	32
Figure 3 : Schéma du procédé de compostage classique.....	52
Figure 4 : Critères de sélection des sites	85
Figure 5 : Schéma de fonctionnement de l'usine A	87
Figure 6 : Schéma de gestion des déchets de la ville B.....	88
Figure 7 : Schéma de fonctionnement de l'usine B.....	89
Figure 8 : Schéma de gestion des déchets de la ville C.....	91
Figure 9 : Points de pesée pour la réalisation du bilan pondéral de l'usine B.....	95
Figure 10 : Exemple de support d'expertise cas de l'étape du tri manuel.....	116
Figure 11 : Comparaison de la répartition des mesures d'humidité obtenues par la méthode normée et par la méthode de thermo-gravimétrie	118
Figure 12 : Comparaison de la répartition des mesures d'humidité obtenues par la méthode normée, par la méthode de séchage à 80°C et par un séchage à l'air libre	119
Figure 13 : Comparaison des méthodes de détermination de la MOT%.....	121
Figure 14 : Consommation d'O ₂ en fonction des teneurs en humidité du substrat	125
Figure 15 : Répartition des valeurs obtenues pour la DBO.....	126
Figure 16 : Evolution de la DBO sur support solide	127
Figure 17 : Evolution de la DBO du compost en milieu liquide	129
Figure 18 : Suivi de la DBO sur un échantillon de déchets urbains en cours de fermentation	130
Figure 19 : Evolution de la consommation d'O ₂ (▲) et de la production de CO ₂ (■) avec l'analyseur de gaz	132
Figure 20 : Estimation de la maturité dans un graphique représentant l'O ₂ consommée d'évaluation de la maturité des déchets verts par Oxitop®	134
Figure 21 : Schéma du procédé de compostage de déchets verts du site A.....	136
Figure 22 : Suivi des paramètres globaux du compostage	137
Figure 23 : Evolution de la granulométrie.....	138
Figure 24 : Répartition des coûts d'exploitation	142
Figure 25 : Evolution du pH (Δ,○) et de la température (▲,●) sur 2 andains.....	145
Figure 26 : Comparaison de l'humidité des andains et des précipitations locales	146
Figure 27 : Interférences entre les paramètres analytiques de l'étude.....	147
Figure 28 : Schéma du procédé de compostage de l'usine B	151
Figure 29 : Comparaison des résultats de granulométrie (en %).....	156
Figure 30 : Evolution de la granulométrie.....	157
Figure 31 : Evolution des catégories de déchets	162
Figure 32 : Evolution de la matière organique dans la chaîne principale.....	163
Figure 33 : Comparaison de l'humidité in situ et calculé (%) pour les différents échantillons triés.....	165
Figure 34 : Evolution de la matière organique totale	166
Figure 35 : Evolution du rapport C/N	167
Figure 36 : Evolution de la concentration en NaCl au cours du compostage du site B.....	168
Figure 37 : Evolution des teneurs en Fe, Pb, Cu, et Cd dans les différentes fractions granulométriques au cours du compostage (mg/Kg)	170
Figure 38 : Suivi des paramètres globaux (H%, T°, pH) de la fermentation en andain	173
Figure 39 : Evolution des formes de l'azote.....	174
Figure 40 : Schéma de planification des actions	189
Figure 41 : Bilans pondéraux sur une usine type	191
Figure 42 : Rentabilité de l'activité de collecte de la ville C	201
Figure 43 : Schéma du dispositif expérimental des blocs aléatoires	206

Préambule

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un programme entre l'Ademe, et en particulier le département Pays Tiers, qui l'a initié, et le laboratoire des Sciences de l'Eau et de l'Environnement de l'Université de Limoges, sur une approche méthodologique d'analyse de la situation du compostage des déchets ménagers dans les Pays en Développement (P.E.D)

La gestion des déchets dans les P.E.D rencontre de nombreuses difficultés, tant du point de vue technique, économique, que méthodologique, organisationnel et sociologique. L'inadaptation aux contraintes locales des modes de gestion aussi bien pour la collecte des déchets que pour leur traitement par compostage ou pour leur élimination par enfouissement, est largement établie. L'ampleur des problèmes appelle des solutions urgentes pour améliorer la situation actuelle des filières d'élimination des déchets :

- échecs des projets enregistrés depuis une vingtaine d'années,
- dégradation accrue de l'environnement où les déchets représentent un impact prédominant et irréversible,
- aggravation des conditions économiques, faiblesse des moyens et des compétences disponibles,
- illusion des solutions toutes faites ou « clés en mains ».

La démarche R&D, dans le secteur des déchets, se traduisant par une démarche expérimentale prenant en compte les paramètres réels, mesurés et analysés localement, est la voie la mieux adaptée. En effet ces données censées être connues *à priori*, sont souvent absentes du fait que dans la plupart des cas de mise en place d'une filière de traitement, la succession de procédures administratives (termes de références, appels d'offre...) et réglementaires ne laisse que peu de place à une adaptation des paramètres par l'expérimentation.

L'Ademe soucieuse de la pérennité et de l'efficacité des projets de gestion des déchets solides dans les villes des P.E.D, a orienté ainsi ses actions vers l'acquisition de données de terrain fondamentales pour l'adaptation des systèmes d'organisation et de traitement. Elle a proposé à ses partenaires un volume d'actions opérationnelles aptes à capitaliser des connaissances techniques, dans trois domaines des déchets solides urbains, l'incinération, l'enfouissement et le compostage.

Pour le compostage industriel des déchets les technologies existantes souvent brevetées, en provenance des pays développés sont lourdes en termes de matériels, de coûts d'investissement et de fonctionnement. Souvent les procédés sont inadaptés aux déchets des P.E.D, certes riches en matière fermentescible et donc humides, mais aussi en indésirables (fines minérales, plastiques) et également aux conditions climatiques locales. Le marché du compost produit n'est pas évalué, sa qualité n'est pas assurée et sa promotion auprès des agriculteurs jamais assurée.

Dixit Bernard Fouilly, responsable du pôle déchets pays tiers à l'Ademe et initiateur de ce programme « *L'arrêt de près d'une centaine d'installations de compostage dans le monde, ne doit pas condamner définitivement cette filière de traitement. Des technologies inadaptées, importées hâtivement, l'absence de préoccupations du marché du compost expliquent cette situation Le compostage doit entièrement répondre aux contraintes des P.E.D sous deux aspects : -exigence de procédés adaptés, fonctionnels..., simples et économiquement modérés..., -exigence de véritable stratégie d'une véritable vulgarisation intégrant les autorités agricoles : connaissance précise de la valeur et de l'usage du compost, diffusion, contrôle de qualité et modalités de suivi régional. »*

Dans le cadre de ce programme, une étude concernant la faisabilité du compostage des déchets urbains dans les P.E.D a été initiée. L'objectif innovant de la démarche est le développement d'outils et l'acquisition de données pour aider à l'évaluation de la faisabilité de la filière compostage comme une étape nécessaire dans la gestion intégrée des déchets urbains dans les P.E.D. L'Ademe a appuyé l'étude d'une part sous la forme d'une bourse, d'une durée de 3 ans et d'autre part, sous la forme d'une aide financière pour la réalisation de l'expérimentation sur site. Le Conseil Régional du Limousin a également participé financièrement dans le cadre de son programme d'appui à la recherche scientifique universitaire.

Introduction générale



Les problèmes d'évacuation, de traitement et en général de gestion des déchets municipaux dans les pays en développement (P.E.D) demeurent cruciaux. Avec l'évolution démographique et l'urbanisation forcée, la quantité de déchets urbains produits ne cesse de croître, devenant une préoccupation majeure à laquelle sont confrontés les responsables locaux, mais surtout les habitants de plus en plus conscients des risques. Les autorités locales, avec l'aide internationale, se sont lancées dans des politiques de gestion globale des déchets, pour définir une filière de traitement la mieux adaptée dans les conditions locales.

Le choix des filières de traitement des déchets dans les P.E.D est orienté le plus souvent vers l'enfouissement mais actuellement la plupart des déchets sont évacués en périphérie des villes dans des décharges plus ou moins contrôlées. Les déchets perdent alors un potentiel de valorisation important en termes de recyclage de matériaux et de production d'un amendement organique par compostage compte tenu de la quantité élevée de matière organique fermentescible.

Cette filière de traitement, très développée dans les années 80, permet de désengorger les décharges et de limiter la propagation des dépôts sauvages, tout en produisant un amendement organique indispensable pour les sols agricoles de ces pays, souvent pauvres en matière organique. De nombreuses initiatives locales d'associations ou d'Organisations Non Gouvernementales ont fleuri dans les villes afin de promouvoir et de réaliser un compostage rudimentaire. Malheureusement, les autorités ont des difficultés à recenser toutes ces actions isolées et à les intégrer dans leur propre système. De nombreuses usines de compostage ont été ainsi implantées dans les villes des P.E.D mais le bilan de fonctionnement de la plupart d'entre-elles reste négatif. Les usines sont rapidement fermées ou ne fonctionnent plus à leur capacité maximale.

La filière du compostage comporte plusieurs étapes : de la production des déchets par les habitants, à la valorisation du compost en incluant la collecte et le traitement biologique. La réussite de cette filière dépend du succès de chacune d'entre elles. Une défaillance d'un maillon de cette chaîne peut entraîner des dysfonctionnements voire un arrêt de la filière. Il est donc essentiel d'analyser tous les critères liés à chacune de ces étapes. De manière générale, les difficultés de gestion des déchets incluant celles liées au compostage dans les P.E.D se manifestent sur plusieurs aspects :

- Aspect institutionnel : le cadre réglementaire est *quasi* inexistant voire obsolète par rapport aux besoins et aux urgences de l'environnement.
- Aspect financier : les municipalités des villes des P.E.D ont peu de moyens financiers pour agir dans le domaine de l'environnement. Les financements proviennent alors d'organismes internationaux comme la banque mondiale sous forme de prêts, d'état dans le cadre de coopération bilatérale.... Leurs objectifs et attentes sont donc bien distincts.
- Aspect administratif et politique : la protection de l'environnement ne fait pas partie des priorités des pouvoirs publics.

- Aspect technique : les normes, les moyens techniques et les compétences sont insuffisants.

Le fonctionnement de cette filière, schématisée Figure 1, devient alors très **complexe** du fait de la multiplicité des acteurs, de leurs influences respectives et de leurs inter-relations, mais aussi à cause du nombre important de paramètres techniques et des indicateurs de fonctionnement.

La question se pose alors de la pérennisation de la filière compostage aux avantages multiples pour les P.E.D. Une méthodologie d'expertise pour une production industrielle de compost de déchets urbains permettrait d'apporter des réponses. Elle doit cependant être « universelle », adaptée à tous les types de procédés, sous tous les climats indépendamment des conditions socio-économiques des usines de compostage implantées. Son utilisation doit être également indépendante de la nature du substrat composté (ordures ménagères, déchets verts ou autres). La méthodologie identifie les dysfonctionnements d'une usine, s'appuie sur l'évaluation du fonctionnement des installations à l'aide d'indicateurs de performances et de bilans massiques. Les exploitants seront aussi en mesure de proposer des voies d'amélioration de leur procédé. Elle pourra être utilisée lors de la conception des usines mais aussi pendant l'exploitation par les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage et aidera les acteurs locaux à choisir la filière adaptée à leurs exigences.

Pour cela il est nécessaire d'analyser, dans un premier temps, les points de dysfonctionnement en synthétisant les informations fournies par le bilan des expériences passées et de l'existant en matière de compostage dans les P.E.D. Cette méthodologie est donc basée sur les critères de dysfonctionnements les plus fréquemment rencontrés dans la littérature ou dans des cas concrets. Ces critères ne pourront être évalués que si des outils adaptés sont employés. Pour cela, ils doivent être simples, faciles de mise en œuvre afin de pouvoir les ajuster sur chaque usine et de pouvoir les transmettre aux différents exploitants. Ils sont de nature variée comprenant d'une part des outils analytiques, d'autre part des outils facilitant la synthèse et l'analyse des informations recueillies sur le site. Les applications à des études de cas de ces outils et de la méthode feront la preuve de l'intérêt de cette méthodologie d'expertise et permettront de valider des résultats analytiques et des choix technologiques. Chaque étude de cas, alimentée de contacts et de données de terrain, permettra d'établir des règles concrètes d'optimisation du fonctionnement de l'usine. De nombreux ajustements entre l'élaboration de cette méthodologie et l'application à des sites permettront de sélectionner les indicateurs les plus pertinents pour évaluer le fonctionnement des usines de compostage dans les P.E.D.

Dans ce contexte, une équipe de chercheurs du Laboratoire des Sciences de l'Eau et de l'Environnement (LSEE) en partenariat avec l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Ademe) a étudié les difficultés de la filière compostage des déchets urbains des villes des P.E.D. Les objectifs de ce travail de recherche s'inscrivent dans la logique des constatations de

l'ADEME sur les dysfonctionnements de la gestion des déchets des P.E.D. Ils tiennent compte non seulement du savoir faire de l'Ademe mais aussi d'un état de l'art bibliographique qui montre la nécessité de pérenniser les filières de traitement des déchets dans les P.E.D et plus particulièrement celle du compostage.

Pour parvenir à l'élaboration de cette méthodologie une analyse bibliographique est essentielle, dans une première partie. Elle fait un état de la problématique de la gestion des déchets urbains dans les P.E.D en insistant sur le bilan des expériences des installations de compostage et de la place de cette filière dans les orientations locales. Une partie plus technique est consacrée aux procédés de compostage employés dans les P.E.D ainsi qu'aux principaux paramètres de contrôle et met en évidence les causes des échecs de l'implantation de cette filière.

Une deuxième partie est consacrée à la présentation des méthodes et des moyens d'analyses employés. D'une part, la démarche à adopter lors de la conception, de l'élaboration et de la réalisation de la méthodologie y est mise en place, d'autre part le matériel et les techniques analytiques y sont définis afin de caractériser les déchets au cours du procédé, d'établir des bilans massiques et hydriques et de juger de la qualité du compost produit.

Dans une troisième partie, les résultats de la mise en place des outils analytiques et des supports d'expertise sont développés. Leurs applications et la validation globale de la méthodologie sur un site de déchets verts en France permettent dans un premier temps de juger de l'efficacité de cette dernière et de son intérêt pour les exploitants. Après un réajustement des outils, la démarche est étudiée sur une usine de compostage des déchets urbains dans les P.E.D dans des conditions réelles de fonctionnement. Un bilan de l'usine est ensuite établi et la sélection des indicateurs les plus pertinents est effectuée afin de valider la méthodologie sur la filière compostage en incluant la collecte, le procédé et également la valorisation du compost.

Figure 1 : Schéma mettant en évidence la complexité de la filière compostage

ASPECTS TECHNIQUES	OUTILS	R&D	Gestion	Communication	R&D	Gestion	R&D	R&D
	INDICATEURS	* Caractérisation * Flux	Satisfaction des usagers	Réactions des usagers	* Productivité * Qualité du compost	* Rentabilité * Voirie adaptée	* Productivité * Qualité du compost	* Valorisation * Rentabilité
	PARAMETRES	* Composition * T/J	* Taux de collecte * Coût	* Densité * Temps de séjour	* Rendement, coût * %MO, %impuretés	* Flux-T/J * Camions (nbre, type)	* Rendement, coût * %MO, %impuretés	* Productivité * Coût T/ha
ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES	FILIERE COMPOSTAGE	Production	<pre> graph LR subgraph "option 1" direction LR P1[Pré-collecte] --- D1[Dépôt] --- CI1[Compostage informel] end subgraph "option 2" direction LR P2[Pré-collecte] --- D2[Dépôt] --- CI2[Compostage industriel] end CI1 --- C1[Collecte] --- CO1[Compostage industriel] CI2 --- C2[Collecte] --- CO2[Compostage industriel] CO1 --- E[Epandage] CO2 --- E </pre>		Collecte	Compostage industriel option 2	Epandage	
	ACTEURS	Habitants Usagers	Secteur informel	Commune Habitants	Secteur informel	Secteur public ou privé		Secteur public ou privé
	ORGANISATION	Familles Associations de quartier	ONG, PME Associations	Services techniques	ONG, PME Associations	Services techniques Entreprise	Services techniques Entreprise	Coopératives Associations
	MOYENS	Information, éducation sensibilisation	Coordination Réglementation	Coordination Réglementation	Formation Technicité	Financement Investissement	Financement Investissement	Informations

* Critères pris en compte dans la méthodologie

Partie I : Analyse bibliographique

Chapitre 1 : Gestion des déchets urbains dans les P.E.D

De par l'évolution de la société et la démographie des P.E.D, les produits et les déchets qui en résultent deviennent de plus en plus nombreux, diversifiés et complexes. Ce caractère hétérogène rend difficile la généralisation d'une filière de traitement à tous les types de déchets. Il faut alors identifier puis intégrer les particularités locales afin de choisir une filière de traitement la mieux adaptée et la plus pérenne possible.

Ce chapitre présente l'hétérogénéité des déchets urbains produits dans les P.E.D, tant par leur caractérisation en différents constituants que par leur composition physico-chimique. Cette diversité se retrouve également à travers le nombre élevé d'acteurs, de modes et de moyens de collecte, qui composent la gestion des déchets dans ces pays.

I. Caractérisation du gisement

I.1. Terminologie et classification

Différentes classifications des déchets existent soit selon leur origine [Loi Française, Annexe II du décret n°2002-540 du 18/04/2002] soit selon la nature du danger qu'ils font courir à l'Homme ou à son environnement [O.E.C.D, 1998]. Cette étude est uniquement consacrée aux déchets urbains, qui représentent l'ensemble des déchets des collectivités c'est-à-dire les déchets des particuliers, ceux des artisans, commerçants et petits établissements collectés avec les ordures ménagères et les déchets produits par les municipalités elles-mêmes. Leur gestion incombe le plus souvent à la municipalité. Différentes catégories se distinguent à l'intérieur des déchets urbains notamment les **déchets ménagers** liés à l'activité domestique. Ils comprennent les ordures ménagères (O.M) au sens strict, les encombrants et les déchets verts. Les déchets ménagers spéciaux (D.M.S) sont les déchets toxiques produits de façon diffuse par les ménages (piles, solvants, peintures).

I.2. Quantité de déchets urbains produits

La connaissance de la production des déchets urbains est essentielle dans la planification d'un système de gestion afin de prévoir au mieux le dimensionnement de la collecte et des installations de traitement. De nombreuses études évaluent la quantité de déchets produits, mais les résultats présentés dans le Tableau 1 montrent des écarts importants.

Tableau 1 : Production de déchets par habitant de plusieurs villes

Pays	Ville	Référence	Production déchets Kg/hab./j
Brésil	Uberlândia	Fehr <i>et al.</i> , 2000	0,51
Cameroun	Yaoundé	Ngnikam, 2000	0,85
Cameroun	Bafoussam	Ngnikam, 2000	0,37
Chine	Hong-Kong	Chung & Pool, 1998	0,7
Chine	Guangzhou	Chung & Pool, 1998	0,4
Malaisie	Kuala Lumpur	Kathirvale <i>et al.</i> , 2003	1,7
Malaisie	Moyenne nationale	Kathirvale <i>et al.</i> , 2003	0,5-0,8
Maroc	Moyenne Nationale	O.N.E.M, 2001	0,75
Mauritanie	Nouakchott	Aloueimine <i>et al.</i> , 2005 a & b	0,21
Mexique	Mexicali	Ojeda-Benitz <i>et al.</i> , 2003	0,59
Etats-Unis	Moyenne Nationale	O.N.E.M, 2001	1,80
France	Paris	www.ordif.com, 2002	1,37

De fortes disparités sont notables entre la production des villes des pays industrialisés (P.I) et celle des villes des P.E.D. Généralement, cette moyenne pour les P.I se situe autour de 1,4 à 1,7 Kg/hab./j

alors qu'elle est beaucoup plus faible, < 1Kg/hab./j pour les P.E.D. Les P.I sont davantage orientés vers une société de consommation et de rapidité d'utilisation avec des produits à durée de vie courte et avec des emballages importants. Dans les P.E.D, les divergences de coutumes entre les villes et les campagnes se retrouvent sur la production de déchets. En milieu rural, le besoin pour l'alimentation des animaux domestiques et le bétail, ainsi que les habitudes de recyclage diminuent cette production, entraînant généralement des écarts entre les résultats, des études ciblées sur une ville précise et la moyenne nationale du pays. En Malaisie, la moyenne nationale se situe entre 0,5 et 0,8 Kg/hab./j alors que dans les villes à forte densité, la production de déchets peut atteindre 1,7 Kg/hab./j [Katirvale *et al.*, 2003]. Cette production varie également d'un quartier à l'autre à l'intérieur d'une même ville, souvent en fonction du niveau de vie de la population. Dans une étude d'Ojeda-Benitz *et al.*, (2003) portant sur la caractérisation des ordures ménagères à Mexicali (Mexique), les quartiers à haut niveau de vie produisent 26% de déchets supplémentaires par rapport aux quartiers d'habitat spontané. D'autres paramètres comme les conditions climatiques influencent le mode d'alimentation de la population et donc la production de déchets urbains. Ainsi à Yaoundé (Cameroun) la production moyenne de 0,6 Kg/hab./j en saison sèche passe à 0,98 Kg/hab./j en saison humide [Ngnikam, 2000]. Les variations saisonnières sont également dues aux migrations de population : le tourisme et/ou les migrations agricoles. A Sao Sebastian (Brésil) la production municipale de déchets est multipliée par 3, passant de 40 à 150 T/j, pendant la période touristique [De Vries, 2001].

Cette variabilité dans la production des déchets urbains est fonction du pays, mais également de la ville, du niveau de vie de la population et des conditions climatiques. Ces écarts peuvent provenir de la méthode même d'évaluation de la production des déchets : évaluation au sein des foyers [Aloueimine *et al.*, 2005 a & b] ou évaluation à l'arrivée des déchets sur les sites de regroupement, de transfert ou de traitement [Tchobanoglous *et al.*, 1993]. Dans ce deuxième cas, il faut tenir compte du secteur non officiel, qualifié d'informel, qui recycle une partie des déchets produits dans une proportion variant de 5% à 25%, respectivement pour Bangkok (Thaïlande) et Jakarta (Indonésie) [Bernache-Perez *et al.*, 2001].

I.3. Composition des déchets urbains

Les déchets urbains constituent un mélange hétérogène de matériaux ayant des propriétés physiques et chimiques très différentes. Cette composition est largement déterminée par la nature des produits et de leurs emballages ainsi que par les pratiques de consommation.

La connaissance de la composition des déchets est essentielle afin d'apprécier les possibilités de valorisation comme le compostage, la récupération de métaux ou d'autres matériaux recyclables : papiers, cartons, verres, plastiques, et d'évaluer aussi la capacité des installations. Les prévisions des

impacts sur l'environnement, en évaluant la nature et la quantité des émissions, permettent un meilleur contrôle sur le procédé et une anticipation des difficultés.

Lors de la caractérisation d'un déchet, plusieurs paramètres sont à identifier : les constituants (papiers, verres, fermentescibles), le caractère physico-chimique (densité, humidité), la concentration en éléments carbonés et azotés et la présence de certains polluants.

I.3.1. Méthode de caractérisation des déchets urbains

La composition des déchets urbains étant très hétérogène, il est nécessaire de regrouper les constituants en catégories homogènes. Pour ce faire, plusieurs méthodes de classification et de caractérisation des déchets sont utilisées. Tout d'abord, le prélèvement des échantillons peut-être réalisé en plusieurs points :

- chez l'habitant afin de connaître la composition des ordures ménagères réellement produite [Aloueimine *et al.*, 2005 a & b],
- sur les sites de transit, pour déterminer la composition des déchets urbains (il faut alors considérer le secteur informel comme précisé ci-dessus),
- en entrée des centres de traitement.

Le tri peut ensuite être réalisé soit sur déchets humides [Ademe, 1993], soit sur déchets séchés à 80°C [Norme Afnor NFX 30-466, 2005]. Les déchets sont séparés par taille, généralement en 4 fractions (supérieure à 100 mm, 20-100 mm, 8-20 mm et inférieure à 8 mm). Les différentes catégories de constituants sont ensuite séparées. Le nombre de constituants varie de 7 [Fehr *et al.*, 2000] à 53 [Bernache-Perez *et al.*, 2001]. La méthode de caractérisation la plus répandue en France est le Mode de Caractérisation des Ordures Ménagères (MODECOM©) [Ademe, 1993], qui détaille 12 catégories de constituants : fermentescibles, papiers, cartons, textiles, textiles sanitaires, plastiques, verres, métaux, inertes, complexes, fines inférieures à 20 mm et autres.

I.3.2. Caractérisation des déchets urbains

La composition des déchets varie d'un pays à l'autre, d'une région à l'autre et même d'un quartier à l'autre [Aloueimine *et al.*, 2005 a & b, Mbuligwe & Kassenga, 2004, Mohee, 2002 ; Wei *et al.*, 2000 ; Waas *et al.*, 1996 ; Cadillon, 1987]. Par exemple, quelques compositions de déchets urbains peuvent être citées dans différents pays, Tableau 2.

Tableau 2 : Composition des déchets urbains dans plusieurs pays (en % massique sur sec)

	Références	Fermentescibles et végétaux	Verres	Plastiques	Papiers & cartons	Métaux
Bénin	Soclo <i>et al.</i> , 1999	45	?	3-4	?	2
Burkina Faso	Folléa <i>et al.</i> , 2001	39	3	10	9	4
Egypte	Ezz, 2003	60	2,5	1,5	13	3
Guinée	Matejka <i>et al.</i> , 2001	69	0,3	22,8 (+ textiles)	4,1	1,4
Ile Maurice	Mohee, 2002	68	1	13	12	1
Inde	Damodaran <i>et al.</i> , 2003	38,6	1	6,03	5,57	0,23
Liban	El-Fadel <i>et al.</i> , 2002	62,4	5,6	11	11,3	2,9
Malaisie	Tawee & Ismail, 2003	36,5	3,2	18,4	27	3,9
Petaling Jaya	Tawee & Ismail, 2003	30,1	1,5	12	30,8	3,2
Malaisie	Tawee & Ismail, 2003	30,1	1,5	12	30,8	3,2
Seberang Perai	Tawee & Ismail, 2003	30,1	1,5	12	30,8	3,2
Maroc	Hafid <i>et al.</i> , 2002 b	65-70	0,5-1	2-3	18-20	5,6
Mexique	Gonzalez del Carpio, 1998	55	4	4	15	6
Mauritanie	Aloueimine <i>et al.</i> , 2005 a & b	4,8	3,8	20	3,6	4,2
Pérou	Diaz, 1997	34,7	7,1	7,2	6	2,8
Tunisie	Hafid <i>et al.</i> , 2002 b	68	2	7	11	4
Turquie	Kanat <i>et al.</i> , 2003	36,1	1,2	3,1	11,2	4,6
Allemagne	Hafid, 2002 a	15	9	3	27,5	6,5
Etats-Unis	Hafid, 2002 a	23,8	5,9	9,4	38,1	7,7
France	Hafid, 2002 a	29	13	11	25	5
Japon	Hafid, 2002 a	30	7-13	8-10	40-42	4-7,5
Grèce	Skordilis, 2004	45	4	11	22	4,5

La fraction fermentescible des déchets est surtout dominante dans les P.E.D dépassant 55 % contre 35 % dans les P.I. A l'inverse, la part de papiers, de verres et de matières plastiques s'accroît dans les pays industrialisés, reflétant ainsi les nouveaux modes de consommation de la population. La part de matière plastique est faible dans les P.E.D (entre 1 et 7 %) tout comme la proportion de métaux potentiellement polluants. Seuls les résultats de la caractérisation des déchets urbains pour Nouakchott sont très divergents. En effet, les fractions fermentescibles et papiers-cartons sont valorisées au sein même des ménages comme alimentation pour les animaux.

Selon le rapport sur l'Etat de l'Environnement au Maroc [O.N.E.M 2001], le pourcentage de M.O a baissé de 75% à 50% entre 1960 et 1999. À l'inverse, la proportion de matière plastique a augmenté dans le même temps de 0,3% à 6-8%. Cela montre une légère diminution de la proportion des matières fermentescibles au profit d'autres produits comme les matières plastiques, provenant d'un changement des modes de consommation et d'une augmentation du niveau de vie de la population.

Une autre caractéristique de la composition des déchets urbains dans les P.E.D est la forte teneur en fines < 20 mm, proche de 50%. Dans la ville de Ouagadougou (Burkina Faso) [Tezanou *et al.*, 2001] 75% (en poids) des déchets sont des fines, alors qu'au Bénin [Soclo *et al.*, 1999], les fines représentent 36% et en Inde 42% [Damodaran *et al.*, 2003]. Elles sont le plus souvent constituées de sables, de

poussières et de petits cailloux pouvant provenir de la vétusté des routes des chemins ou des pistes [Roux *et al.*, 1988 ; Roux, 1987].

De nombreuses études ont également montré l'importance des conditions et du mode de vie de la population et de l'influence des saisons [Beture Environnement, 2001]. Les habitudes alimentaires sont fonction du niveau de vie, du type d'habitation et des époques de l'année: la production de fruits et légumes étant plus importante en été, la part de matières fermentescibles s'en trouve augmentée [Ngnikam, 2000 ; Arinola & Arinola, 1995].

I.3.3. Composition physico-chimique des déchets urbains

La connaissance de la composition physico-chimique des déchets permet d'estimer les pollutions possibles sur l'environnement et sur l'Homme. Par la suite, il est donc plus facile d'entreprendre des procédures de contrôle et de réduction des émissions polluantes.

I.3.3.1. Densité

La densité des déchets urbains est comprise entre 0,4 et 0,2 en fonction des pays (Maroc 0,35 ; Tunisie et Colombie 0,3 ; Malaisie 0,24 ; Pakistan, 0,13) [Wicker, 2000 ; Zurbrugg & Ahmed, 1999 a]. Du fait de la proportion importante de matières fermentescibles et d'humidité dans les déchets, constituants plus lourds, la densité est en moyenne plus élevée dans les P.E.D que dans les P.I (en France, elle est voisine de 0,2).

I.3.3.2. Humidité

La majorité des déchets des P.E.D ont une teneur en eau importante, comprise entre 50 à 95% (Cf. Tableau 3).

Tableau 3 : Teneur en eau des déchets urbains

	<i>Burkina Faso</i>	<i>Chine</i>	<i>Corée</i>	<i>Ghana</i>	<i>Maroc</i>	<i>Mauritanie</i>	<i>France</i>	<i>Liban</i>
Références	Folléa <i>et al.</i> , 2001	Wei <i>et al.</i> , 2000	Shin <i>et al.</i> , 1997	Asomani-Boateng <i>et al.</i> , 1996	Begnaud <i>et al.</i> , 1990	Aloueimine <i>et al.</i> , 2005	Ademe, 1999	El-Fadel <i>et al.</i> , 2002
Humidité %	40-60	60-80	70-78	70-95	60-70	9	35	60-75

L'humidité moyenne des déchets est supérieure à 50% pour les P.E.D. Elle provient de la nature même des déchets, constitués en forte proportion de matière organique (fruits et légumes). La faible humidité de la ville de Nouakchott provient de la faible proportion de fermentescibles et de papiers cartons (donnés aux animaux) et du climat saharien. En Europe et notamment en France, l'humidité

approche 35% due à la faible proportion de matières fermentescibles et au pourcentage non négligeable de plastiques.

I.3.3.3. Paramètres chimiques globaux

Des exemples de caractérisations chimiques des déchets sont donnés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques chimiques moyennes de plusieurs déchets urbains

<i>Paramètres</i>	<i>Tunisie</i>	<i>Malaisie</i>	<i>Espagne</i>	<i>France</i>
	[Hassen <i>et al.</i> , 2001]	[Kathirvale <i>et al.</i> , 2003]	[Garcia <i>et al.</i> , 2005]	[Ademe, 1999]
Matière organique totale (%MS)			51	59,2
Carbone (%MS)		46,11		33,4
Azote (%MS)		1,26	41,8	0,73
C/N	24,40	36,59		45,75
Hydrogène (%MS)		6,86		Nc
Oxygène (%MS)		28,12		Nc
Souffre (%MS)		0,23		0,28
Chlore (ppm) (MS)		8,840		14
Cd (ppm) (MS)	2,86	0,99	2	4
Cr (ppm) (MS)	59,23	14,41	30	183
Cu (ppm) (MS)	128,33	Nc	289	1048
Hg (ppm) (MS)		0,27	Nc	3
Ni (ppm) (MS)	59,60	Nc	Nc	48
Pb (ppm) (MS)	214,7	26,27	206	795
Zn (ppm) (MS)	615,33	Nc	160	1 000

Nc : Non communiqué

Le Tableau 4 rapporte les valeurs caractérisant le potentiel polluant d'un déchet ménager. Cette pollution est d'origine diverse : organique, minérale et métallique. La matière organique totale (M.O.T) est apportée en grande partie par les fractions fermentescibles mais aussi en part plus faible par le papier et le carton. La matière organique azotée est quant à elle générée principalement par les matières fermentescibles, à moindre titre par les textiles et les combustibles. Les éléments minéraux sont dus aux verres, métaux, sables et graviers retrouvés en forte concentration dans les P.E.D. Au-delà des sources couramment citées telles que les piles, la présence d'éléments métalliques dans les ordures ménagères peut provenir des pigments utilisés dans la peinture, des papiers colorés d'emballage [Meoun & Le clerc, 1999].

Le **pouvoir calorifique inférieur** (P.C.I) des déchets est aussi un paramètre nécessaire pour définir la faisabilité d'un traitement par l'incinération. Dans les P.E.D, il est en moyenne assez faible de l'ordre de 1 000 Kcal/Kg (Maroc, Tunisie, Côte d'Ivoire et Colombie [Wicker, 2000]) voire inférieur à 1 000 Kcal/Kg en Inde [Dayal *et al.*, 1993], mais il peut parfois s'élever à 2 180 ou 2 774 Kcal/kg respectivement pour la Malaisie [Kathirvale *et al.*, 2003] ou la Mauritanie [Aloueimine *et al.*, 2005 a

& b]. Ce P.C.I élevé est favorisé par une faible humidité et un taux relativement important de plastiques.

La forte hétérogénéité des déchets provient d'une multitude de paramètres dont Wicker fait état dans sa communication de 2000 citée précédemment. Les paramètres sont les suivants : le lieu géographique, le climat, la saison, la situation économique, la structure de l'habitat, les équipements collectifs, le niveau et le mode de vie de la population ... Cette hétérogénéité est à la source de la difficulté à trouver des solutions optimales de traitement.

II. Cadre institutionnel de la gestion des déchets urbains

II.1. Acteurs

De nombreux acteurs interviennent dans la gestion des déchets urbains à différents niveaux. Bien souvent, la responsabilité en matière de gestion quotidienne incombe aux communes. Cinq acteurs se répartissent la lourde tâche de la gestion des déchets des villes :

- Le **secteur public** représenté par les autorités locales (commune, préfecture),
- Le **secteur privé** formé de petites et de grandes entreprises,
- Le **secteur informel** composé soit par des particuliers rassemblés en association de quartier, soit par des petites entreprises non officielles, s'occupant de la pré-collecte en porte à porte (P.A.P). Ce secteur est une caractéristique de la gestion des déchets urbains dans les villes des P.E.D. Il est représenté par une population à très bas revenu, qui pour survivre, récupère les matériaux directement dans les poubelles du producteur, ou sur les points de transit ou les sites de traitement. Le secteur informel prélève tous les recyclables (cartons, plastiques, piles) et les réutilisables (verres, ferrailles, textiles) d'abord pour leur consommation personnelle, puis pour les revendre après restauration. Environ 2% de la population des villes d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine survit grâce à la récupération de matériaux, exemple des « Zabbaleen » au Caire [Medina, 1998].
- La **population**, premier producteur, bénéficie souvent d'un service de collecte. Sa contribution financière est soit directe par le recouvrement des redevances, soit indirecte par le biais des impôts et taxes locales.
- Les **O.N.G** et les **associations**, très nombreuses dans les P.E.D, doivent leur essor aux défaillances des communes ou autres autorités compétentes dans le domaine de l'environnement. Elles fondent leurs actions sur les liens sociaux entretenus avec la population. Avec une organisation structurelle assez précaire, elles offrent un service apprécié par une population mobilisée dans tous les programmes d'amélioration du cadre de vie. Malheureusement, avec de faibles moyens financiers et techniques, leurs actions n'ont que peu d'impact. A Bangalore, le système de collecte était organisé par apport volontaire (A.V) dans des containers. Les points de transit étant irrégulièrement collectés, les déchets

envahissaient les alentours des sites. La population a alors décidé de mettre en place une collecte P.A.P pour diminuer les nuisances dues à la surcharge des points de transit [Poornima & Manjula, 2001].

Le rôle et l'implication de chaque acteur dans le système de gestion des déchets sont très variables et dépendent du mode de gestion. Le Tableau 5 présente les rôles et les responsabilités de chaque acteur de la gestion. Une multitude d'acteurs intervient, la prise de décision est alors plus difficile et la mise en place des actions plus complexes.

Tableau 5 : Rôles des acteurs de la gestion des déchets

ACTEURS	ROLES	RESPONSABILITES
Secteur public	<ul style="list-style-type: none"> - Délivrances des autorisations d'intervention - Sensibilisation, dissuasion des populations, répression si besoin - Evacuation des déchets des dépôts de transit vers la décharge finale - Appui technique au secteur privé - Entretien et maintenance de la décharge - Elaboration et mise en application de textes réglementaires sur la gestion des déchets - Sensibilisation, éducation des populations - Ramassage des déchets urbains 	<ul style="list-style-type: none"> - Service de tutelle - Coordination des actions d'assainissement de la ville - Veille à l'application des textes et lois – Répression si besoin
Secteur privé	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilisation, éducation des populations - Suivi et évaluation des activités de ramassage - Création d'emploi 	<ul style="list-style-type: none"> - Offre d'un service de qualité aux abonnés - Respect des engagements vis-à-vis des partenaires (population et municipalité)
Secteur informel	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilisation, éducation des populations - Ramassage des déchets urbains - Revente des recyclables et re-utilisables - Mise en poubelle des déchets devant leur concession 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution du gisement de déchets entrant en décharge
Population	<ul style="list-style-type: none"> - Participation aux activités de salubrité et d'hygiène du quartier - Sensibilisation et information 	<ul style="list-style-type: none"> - Respect des conditions de mise en poubelle - Paiement des redevances et taxes - Respect des normes d'hygiène public - Paiement des taxes mensuelles
Groupements (de femmes, de quartiers, d'enfants)	<ul style="list-style-type: none"> - Organisation de rencontres - Sensibilisation et information dans les rues et les concessions 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilisation - Veille à la sauvegarde de l'environnement
O.N.G et associations déclarées	<ul style="list-style-type: none"> - Appui technique et financier - Mise en relation avec d'autres partenaires - Appui pour le suivi et l'évaluation 	<ul style="list-style-type: none"> - Aide à l'assainissement

II.2. Cadre réglementaire

La législation internationale en matière de gestion des déchets concerne de manière générale les déchets dangereux (Convention de Bâle sur les déchets dangereux, ratifiée le 5 octobre 2001) et leurs transports (Convention de Bamako sur l'interdiction de transfert des déchets dangereux en Afrique, signée en 1990) ou les polluants organiques persistants (Convention de Stockholm sur les Polluants Organiques Persistants a pour objectif de protéger l'environnement et la santé humaine contre les effets des POPs, signée le 23 mai 2001 à Stockholm). Mais peu de conventions ou de législation internationale traitent de la gestion des déchets urbains [Yeye, 2002]. La responsabilité de cette gestion est définie, dans chaque pays par la loi, qui délègue le pouvoir aux autorités locales et aux municipalités [E.E.A.A, 2000 ; E.E.A.A, 2002]. La prise de conscience des différents gouvernements en matière de gestion des déchets, appuyée par les politiques mondiales, s'est concrétisée par la création des ministères de l'environnement ou de structures équivalentes dans les années 90. Différents textes orientés sur la décentralisation ont par la suite été votés. Au Cameroun, la nouvelle constitution de 1996 prévoit la création des collectivités territoriales décentralisées, qui jouissent d'une grande autonomie de gestion [Ngnikam, 2000].

Peu de lois sont en vigueur concernant la gestion des déchets solides, celles existant ne sont pas réactualisées (datant de 10 ans). Les normes sont actuellement obsolètes en comparaison de celles demandées dans les pays industrialisés. Rares sont les P.E.D ayant une législation spécialement dédiée aux déchets urbains. Le peu existant dans ce domaine est actuellement désuet à cause de leur faible fréquence de révision.

II.3. Types de gestion : exemples dans les P.E.D

Le choix du mode de gestion de la collecte dépend du contexte local de la ville et des études préalables de faisabilité des prestations alternatives [www.oieau.fr, Acero-dubail, 1995].

II.3.1. Gestion directe en régie

Dans la majorité des villes des P.E.D, le secteur public a en charge le service de collecte des déchets urbains, il s'agit le plus souvent des services techniques municipaux de la ville. Une étude de l'Agence française du Développement [Folléa *et al.*, 2001] montre que l'intervention d'autres opérateurs comme le service des travaux publics ou de l'armée, reste exceptionnelle. La participation du secteur public se situe majoritairement au niveau du transport des déchets et non de la collecte en P.A.P. La gestion directe et publique a été le mode le plus fréquent dans les P.E.D. Les responsables locaux conservent ainsi le pouvoir de décision sur ces activités. Depuis une dizaine d'années, les

mentalités changent avec la décentralisation et la notion de rentabilité, faisant apparaître d'autres intervenants pour prendre en charge l'assainissement.

II.3.2. Gestion déléguée

Beaucoup de systèmes associent les autorités locales et le secteur privé. Le secteur public étant responsable de la gestion des déchets urbains, délègue généralement une partie de ses activités à une ou plusieurs entreprises privées en accordant une licence à toute entreprise participant à la gestion des déchets [Cointreau-Levin, 1996]. Les contrats entre le secteur public et les grandes entreprises, sont différents de ceux avec les petites entreprises. Les petites entreprises s'occupent uniquement de l'enlèvement et de la centralisation des déchets alors que les grandes entreprises assurent en plus le transport et le traitement.

L'entrepreneur privé construit les ouvrages et les exploite à ses frais. A Manila (Philippines), la municipalité a accepté un contrat avec un groupe étranger, se préoccupant plus de la réalisation de bénéfices que du bon déroulement de la collecte [Baud, 2001]. A Chennai (Inde), la collecte et le nettoyage des rues, délégués à un grand groupe international français, doivent leurs succès à la précision et aux termes du contrat passé avec la municipalité [Zurbrugg, 2003 b].

Les entreprises, de taille modeste, sont souvent des sociétés locales, dont le contrat avec la municipalité assure l'existence d'un marché potentiel suffisant à long terme. Les investissements sont réalisés par la municipalité conservant l'autorité et le pouvoir de décision, seule est confiée à l'entreprise l'exploitation. Ce système favorise le développement des petites entreprises locales. La ville de Lima (Pérou) est divisée en 43 districts, où des entreprises privées, de tailles variables, sont en contrat avec les services de propreté des districts [Baud, 2001].

II.3.3. Gestion communautaire

Les différentes associations de quartiers et leurs représentants forment avec les O.N.G, la partie communautaire de la gestion des déchets solides municipaux. Les partenariats entre le secteur privé ou public et le secteur communautaire sont de plus en plus fréquents en raison de l'augmentation des déchets. Les O.N.G organisent des programmes de formation et de sensibilisation de la population ainsi que des actions de collecte ponctuelle. A Bamako (Mali), les collectifs de quartiers sont les initiateurs de la « journée de salubrité » et du « concours de salubrité », pour sensibiliser les populations aux dangers des dépôts sauvages et les convaincre de s'abonner au système de ramassage des déchets urbains [Diarre, 1997].

Le faible développement de la collecte dans les P.E.D est dû au regroupement des usagers en concession sur un même forfait, ainsi qu'à la concurrence des charretiers individuels ou à la présence gratuite de containers publics. La gestion privée est de plus en plus fréquente grâce à différents

avantages, comme l'indépendance politique et économique. Ce système est souvent plus dynamique, plus efficace et bénéficie de moyens financiers plus importants et d'une prise décisionnelle moins ramifiée. A Kumasi (Ghana), la privatisation s'est effectuée en 1998 avec le P.A.P comme mode de collecte retenu [Post, 1999]. Pourtant le développement de la privatisation est limité par la réticence de responsables locaux souhaitant conserver le pouvoir de décision.

La comparaison des prestations fournies par les différents opérateurs privés, publics, et communautaires est difficile à établir de manière fiable. Les modes de collecte, de traitement et les moyens disponibles sont rarement identiques pour un même type d'opérateur. L'efficacité de la collecte puis celle du traitement sont difficilement évaluables, beaucoup de données ne sont pas disponibles ou sont frappés d'une forte incertitude.

III. Collecte

Les grands principes de la collecte des déchets urbains sont indissociables des filières de traitement, et notamment de la qualité des produits valorisés comme dans la filière du compostage.

La collecte traditionnelle des déchets urbains est le système de gestion le plus fréquent dans les P.E.D. Quotidienne dans certains quartiers, elle fluctue en fonction des dispositions mises en place par les services techniques des villes, du niveau d'organisation (association de bénévoles, O.N.G) et de l'état des infrastructures routières. Le tri sélectif n'est que très rarement envisagé à cause de l'important investissement financier sur le plan de l'équipement, nombre de poubelles et augmentation de la fréquence de ramassage, mais aussi à cause du manque de formation et sensibilisation de la population.

III.1. Taux de collecte

Le taux de collecte ou taux de couverture de la collecte est un indicateur fréquemment rencontré dans la littérature scientifique, pour son intérêt dans l'évaluation des performances techniques du service de collecte. Le Tableau 6 regroupe les taux de collecte des déchets urbains dans plusieurs villes des P.E.D.

Tableau 6 : Taux de couverture de la collecte des déchets urbains

<i>Pays</i>	<i>Ville</i>	<i>Références</i>	<i>Caractéristique de la collecte</i>	<i>Taux de couverture formels</i>
Burkina Faso	Ouagadougou	Waas, 1996		30%
Burkina Faso	Ouagadougou	Folléa <i>et al.</i> , 2001	A.V & P.A.P	36%
Burkina Faso	Bobo-dioulasso	Folléa <i>et al.</i> , 2001	A.V & P.A.P	57%
Cote d'Ivoire	Abidjan	Kopieu, 1996	P.A.P & A.V	60%
Ghana	Accra	Obirih-Opareh, 2002 Folléa <i>et al.</i> , 2001	A.V & P.A.P	60%
Guinée	Conakry	Cointreau-Levine, 1996	Pré-collecte & P.A.P	10%
Inde	Chennaï	Baud, 2001		82%
Indonésie	Denpasar	Bertolini, 1989	Pré-collecte & A.V	70%
Mali	Bamako	Diarre, 1997	Pré-collecte	45%
Pérou	Lima	Baud, 2001		60%
Sierra Leone	Freetown	Cointreau-Levine, 1996		80%
Vietnam	Hanoï	Porlier, 2000	Pré-collecte & A.V	70%

P.A.P : Porte à porte, A.V : apport volontaire

Si le taux de collecte est très variable, il reste, d'une manière générale, insuffisant dans les P.E.D. Alors qu'il est voisin de 100% pour les P.I. Il existe une grande disparité du taux de couverture en fonction des villes (allant de 10% pour Conakry à 80% pour Chennaï) et en fonction des quartiers desservis. La priorité est accordée aux quartiers administratifs et aux quartiers de haut et moyen standing, ayant des facilités pour rémunérer ce service. Les moyens (financiers, techniques ou humains) alloués pour ces zones sont généralement suffisants, permettant à une forte majorité des déchets d'être collectés. Les zones les plus démunies sont laissées à l'abandon ou ne bénéficient que d'actions ponctuelles. Ainsi au Maroc, le taux de collecte est voisin de 70-85% en zone urbaine alors que les zones rurales possèdent une collecte irrégulière et faible approchant les 2% [O.N.E.M, 2001].

La coexistence de plusieurs filières de collecte (officielle et informelle) pour une même ville, suscite la concurrence entre les acteurs et pénalisent les activités de collecte. La mauvaise qualité de ce service (problème de recouvrement) rend la population résistante au paiement de ce dernier qu'elle juge insuffisant [Acurio, 1997]. La disparité des taux de couverture ne peut pas s'expliquer uniquement par le choix du mode de collecte employé, puisque tous utilisent une combinaison de systèmes de collecte.

III.2. Mode de collecte

La collecte des déchets urbains peut prendre trois formes principales dans les villes des P.E.D selon le pays, la taille de la ville, les moyens financiers et techniques disponibles. Ces trois formes sont la pré-collecte par moyens légers, l'apport volontaire centralisé via des containers et enfin l'enlèvement en P.A.P par des moyens lourds.

III.2.1. Pré-collecte par moyens légers

Le collecteur recueille les déchets urbains déposés dans différents containers de petites tailles (bassine, seau, poubelle ...) devant la porte du domicile. Il collecte ces déchets à l'aide de moyens légers : charrette (à bras, conduite par des ânes ou tiré par des vélos), brouette ou bac métallique comme à Yaoundé (Cameroun) [<http://www.ulg.ac.be>, Zurbrugg, 1999 a] Lorsque la charrette est pleine, elle est conduite à un point de transit, dont le nombre dépend de la taille de la ville et de la densité de la population. Ces sites de transit peuvent être construits en dur ou simplement correspondre à une benne parfois avec des aménagements spécifiques, clôture ou grillage. Des véhicules motorisés et de forte contenance, camions ou tracteurs, transportent alors les déchets jusqu'à la décharge. A Hanoi (Vietnam), la collecte est réalisée par 2 000 employés qui recueillent les déchets chez l'habitant et les transportent par charrettes vers 92 points de transit de la ville. Les déchets sont ensuite transférés par 40 camions munis de « monte-charge » soit à la décharge, soit vers des usines de compostage pour y être traités [Porlier, 2000].

III.2.2. Apport volontaire en containers

L'apport volontaire (A.V) est le dépôt des déchets par les habitants (la ménagère ou un des enfants de la famille) en un endroit où le service de collecte pourra les enlever. Les containers sont déchargés, comme précédemment, au niveau d'un site de transit, puis acheminés à la décharge par moyens lourds, ou directement transportés à la décharge. Ce système n'est plus utilisé dans les P.I pour les déchets urbains bruts (sauf pour des habitations isolées) mais plus souvent pour des matériaux recyclables (verres, papier cartons, plastiques...). Il reste par contre très répandu dans les villes des P.E.D, notamment en Chine [Chung, 1998], mais aussi en Asie ou en Afrique.

III.2.3. Porte à porte par moyens lourds

La collecte en porte à porte (P.A.P) fréquent dans les P.I concerne surtout les centres administratifs et les quartiers résidentiels d'un certain standing dans les P.E.D. La collecte s'effectue par moyens lourds (camions spécialisés ou non, tracteurs) devant chaque ménage puis les camions déversent à la décharge. Cependant, selon la taille de la ville ou la capacité des bennes, le déchargement est réalisé au niveau d'un centre de transit et sera ensuite acheminé à la décharge. A Yaoundé (Cameroun), la ville n'est pas dotée d'une station de transfert et les camions qui collectent en P.A.P, déversent directement sur la décharge ou dans l'usine de compostage de la ville [Ngnikam, 2000].

Ces méthodes ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients, dont les responsables de gestion locale doivent avoir conscience pour choisir la solution la mieux adaptée aux conditions spécifiques de leur ville. Les paramètres principaux guidant le choix des décideurs locaux sont décrits dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Comparaison des modes de collectes des déchets urbains dans les P.E.D

<i>Modes de collecte</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Pré-collecte ou collecte primaire	<ul style="list-style-type: none"> - Coût faible (fonctionnement, entretien et réparation) - Création d'emploi (collecteurs et fabricants de charrettes) - Collecte des points difficiles d'accès - Collecte de tous les quartiers 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'intervenants - Irrégularité des fréquences de collecte - Recouvrement irrégulier et anarchique de la taxe ou de la de redevance
Post-collecte ou collecte secondaire	<ul style="list-style-type: none"> - Rupture dans la chaîne de transport 	<ul style="list-style-type: none"> - Zone de transit (emplacement protection)
Collecte par A.V	<ul style="list-style-type: none"> - Investissement moyen - Participation de la population, prise de conscience des habitants 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre limité de containers et volume réduit - Distance faible à parcourir - Aménagement du lieu de stockage des containers - Irrégularité des fréquences de collecte
Collecte en P.A.P	<ul style="list-style-type: none"> - Efficacité - Propreté des quartiers administratifs et touristiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'une voirie en bon état - Coût élevé (fonctionnement et réparation) - Collecte « sélective » des quartiers à haut standing

III.3. Moyens de transport

L'une des caractéristiques majeures des villes des P.E.D est l'insuffisance et le mauvais état des voies de circulation. Elles sont souvent mal entretenues et ne permettent pas une bonne circulation des camions de collecte. De plus, les véhicules sont chers et peu disponibles sur le marché local. Les différents types de collecte des déchets urbains nécessitent des modes de transport urbain allant des plus rudimentaires (charrettes) aux plus sophistiqués comme par exemple des camions benne [Zurbrugg, 1996].

La **charrette** est le moyen de collecte le plus commun dans les P.E.D. La charrette à traction humaine assure une forte part de l'enlèvement des ordures ménagères de Conakry (République de Guinée) avec un parc d'environ 300 charrettes gérées par une trentaine de petites entreprises [Folléa *et al.*, 2001]. La charrette à traction animale (souvent un âne) est utilisée pour le transport courant des marchandises dans la plupart des villes marocaines et dans une moindre mesure dans les villes de l'Afrique de l'Ouest. Dans les années 80, à Accra (Ghana), le choix des charrettes à ânes avait été privilégié pour compenser les voiries difficiles d'accès pour les camions et pour s'assurer de la régularité de la collecte. Cette solution fut abandonnée à cause d'une mortalité élevée des ânes [Obirih-Opareh, 2002].

Le **trporteur**, motorisé ou à pédales est très courant dans certains pays de l'Afrique du Nord et surtout d'Asie. A Mirpur (Bangladesh), une collecte P.A.P est effectuée par des tricycles jusqu'au point de transit [Zurbrugg, 2002 ; Pfammater & Schertenleib, 1996].

Le **camion** benne est le véhicule le plus fréquent dans les grandes villes des P.E.D. Des camions évacuent les déchets urbains de la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire), du point de transit de Williamsville à la décharge d'Akouédo [Waas, 1996]. Certaines grandes capitales, comme Dakar (Sénégal), ont investi dans l'achat d'équipements performants (bennes tasseuses, et camions Roll-On) [Diop, 1989].

III.4. Coût de la collecte

Chaque mode de collecte et de transport engendre des dépenses en fonction du nombre d'habitants desservis, de la sophistication des équipements et du volume de déchets collectés. Les coûts réels sont souvent mal estimés : de nombreuses dépenses supplémentaires sont oubliées comme l'inflation, l'amortissement sur le matériel, les assurances. Le coût de collecte augmente avec le niveau de développement des pays, cela se concrétise par une amélioration du service *via* l'utilisation d'équipements plus sophistiqués. Le Tableau 8 présente des prix de revient de la collecte pour plusieurs villes africaines, avec des systèmes pluridisciplinaires comme le P.A.P, l'A.V ou la pré-collecte. Ils semblent assez élevés mais les modalités du calcul et le mode de gestion employé ne sont pas connus.

Tableau 8 : Prix de revient de la collecte [Folléa et al., 2001 ; Ngnikam, 2000]

<i>Pays</i>	<i>Ville</i>	<i>Prix de revient (€/m³ enlevé)</i>
Burkina Faso	Ouagadougou	1,8
Cameroun	Yaoundé	7
Guinée	Conakry	3
Maroc	Rabat	9
Maroc	Agadir	16
Sénégal	Dakar	8
Sénégal	Louga	1,8

Le coût de collecte est inférieur à 10 €/m³ enlevé, sauf pour Agadir, 16 €/m³, où le système est très sophistiqué. La variabilité du prix de la collecte provient également des possibilités de paiement des habitants, ainsi ceux ayant de faible revenu ne peuvent consacrer que 1% de leur revenu total mensuel à la gestion des déchets contre 60% pour la nourriture, et le logement [Pfammater & Schertenleib, 1996]. Le prix de la collecte doit également prendre en compte le niveau de vie de la population et leur possibilité financière. La sophistication et la productivité des véhicules utilisés sont des facteurs importants dans le budget de la collecte. Dans les P.E.D, le coût des véhicules est souvent plus important que celui de la masse salariale [Van de Klundert & Anschutz, 2001].

Dans les P.E.D, il n'existe pas un mode de collecte prédominant mais des multitudes de combinaisons entre les modes de collecte et les moyens de transport. Quand la collecte comprend une

étape de pré-collecte, elle est généralement assurée par le secteur informel, les services communaux assurant la collecte. Dans certains cas, une grande entreprise assure la collecte en P.A.P.

IV. Traitements

Dans les P.E.D, une forte majorité des déchets est mise en décharge (le plus souvent non contrôlée) ou dispersée dans les rues et les champs. Etant donné la quantité de déchets et la nature complexe de ceux-ci, leurs traitements doivent prendre une dimension industrielle. Cela se traduit par la mise en œuvre de technologies plus performantes, permettant ainsi de poursuivre sur la voie du développement durable. Pour réduire les impacts environnementaux, différentes techniques existent comme le stockage dans les centres d'enfouissement technique présentant les meilleures garanties de protection de l'environnement, l'incinération ou la valorisation par la voie du réemploi, du recyclage ou du compostage.

IV.1. Mise en décharge

La mise en décharge est la méthode de traitement la plus répandue dans le monde. Les P.E.D y traitent plus de 90% de leurs déchets. Il existe différentes techniques de mise en décharge plus ou moins contrôlées [Robinson, 2003 ; Johannessen 1999 ; Johannessen & Boyer, 1999]. Cette technique est employée depuis longtemps mais sans véritable contrôle sur les impacts engendrés. Leur gestion est aussi rendue difficile par manque de données sur la nature et la composition des déchets enfouis, l'humidité ou leur évolution au cours du temps [Zurbrugg & Schertenleib, 1998].

Les décharges des P.E.D deviennent de plus en plus contrôlées et s'accompagnent donc d'une augmentation de la technicité : isolation hydrogéologique partielle ou totale, planification du placement et de la couverture des déchets, réseaux de récupération des biogaz et des lixiviats [Thurgood, 1998]. Si le coût des décharges contrôlées est évidemment supérieur à celui des décharges sauvages, celui de la réhabilitation est par contre plus faible à leur fermeture.

IV.2. Valorisation

IV.2.1. Réemploi et recyclage

Les différentes matières recyclables présentes dans les déchets urbains peuvent être récupérées. Un tri manuel des déchets est réalisable à différents niveaux de la filière : avant et pendant la collecte, ou sur les sites de traitement. La pérennisation de ce système est basée sur un marché stable avec des prix attractifs. Au Maroc, les prix de revente du papier-cartons, des matières plastiques, du verre et des métaux sont respectivement 20, 75, 10 et 22,5 €/T, ce qui reste concurrentiel par rapport aux marchés

des P.I. Ce recyclage est réalisé le plus souvent par le secteur informel collectant entre 5 et 25 % des déchets produits [Bernache, 2001 ; Bertolini, 1989]. Le prix des matériaux recyclés varie en fonction de l'offre et de la demande locale. D'une manière générale, les matières recyclables constituent une richesse que se partagent les différents intervenants du secteur informel soit plus de 2% de la population d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine [Medina, 1998].

IV.2.2. Compostage

Le compostage est adapté aux P.E.D du fait de la proportion importante de matière organique contenue dans les déchets urbains et de la volonté de réduire le gisement entrant en décharge. De plus, ce traitement permet l'obtention d'amendements organiques indispensables au sol, mis à rude épreuve entre le lessivage en période des pluies et la saison sèche. Il n'est pas un moyen de traitement unique des déchets, il doit être complémentaire de la gestion des décharges.

IV.3. Incinération

L'incinération est une méthode de traitement très répandue dans les P.I demandant des investissements mais aussi une surveillance et une maintenance des équipements spécifiques. Le P.C.I est relativement faible dans les déchets des P.E.D environ 1 000 Kcal/Kg [Wicker, 2000] et ne permet pas une auto-combustion en raison de la teneur en humidité trop élevée des déchets. A Paris le PCI moyen des déchets urbains évolue avec leur composition et a augmenté de 1 900 à 2 100 Kcal/Kg en quelques décennies [Damien, 2004], valeur suffisante pour une auto-combustion. Le contrôle des rejets d'incinération comme les gaz résiduels des torchères, les cendres volantes et les mâchefers est de plus en plus réglementé nécessitant des innovations technologiques et du personnel qualifié.

Le choix de l'incinération comme filière de traitement des déchets est peu retenu dans les P.E.D, à cause de la difficulté de combustion due à la nature même des déchets, de l'investissement de départ et également des frais élevés de fonctionnement [Rand, 2000].

IV.4. Comparaison des traitements

Le choix d'un procédé de traitement dépend de plusieurs paramètres dont la composition et la production quotidienne de déchets, les installations préexistantes, le potentiel recyclable des déchets, les investissements à prévoir, les orientations politiques... Aucune technique n'est universelle et applicable en toutes conditions. Le Tableau 9 présente les atouts et les contraintes des traitements les plus fréquents dans les villes des P.E.D.

Tableau 9 : Comparaison des techniques de traitement des déchets urbains [Kalogo, 2002 ; Thonart, 2002 ; Rand, 2000]

<i>Technique</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Mise en décharge traditionnelle	<ul style="list-style-type: none"> - simple - coût - personnel peu qualifié 	<ul style="list-style-type: none"> - évolution lente, longue (40-50 ans) et sujettes aux conditions locales - émanation de gaz - contamination des sols, des eaux - dégagements d'odeurs nauséabondes - difficulté de contrôle de la stabilisation - réhabilitation coûteuse - occupation importante des sols
Mise en décharge contrôlée	<ul style="list-style-type: none"> - coût d'implantation - site réutilisable dans certaines conditions - contrôle de la stabilisation 	<ul style="list-style-type: none"> - limitation et contrôle des rejets (gaz & lixiviats) - réhabilitation coûteuse - occupation importante des sols - évolution lente
Incinération	<ul style="list-style-type: none"> - destruction des déchets solides de toute nature - élimination des déchets biologiquement contaminés - valorisation des mâchefers en remblais routiers - peu d'espace (implantable en milieu urbain) - récupération d'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> - coût - personnel qualifié - traitement des fumées exigé avant rejet dans l'atmosphère - présence d'eau - traitement des REFIOM (refus d'épuration des fumées des incinérateurs d'ordures ménagères) - élimination des mâchefers
Compostage	<ul style="list-style-type: none"> - peu d'équipements - personnel peu qualifié - amendements pour l'agriculture - destruction des pathogènes 	<ul style="list-style-type: none"> - étape minutieuse de prétraitement - présence éventuelle de métaux lourds - mélange des déchets - variations de composition du substrat

Les P.E.D utilisent majoritairement la mise en décharge, entre 90 à 97% des déchets produits respectivement au Cameroun [Hafid, 2002] et en Israël [Nissim, 2003], peu sous forme de centres d'enfouissement techniques respectant l'environnement. La répartition entre les autres filières, recyclage et incinération, n'est pas connue pour les P.E.D. Toutefois, l'incinération est rarement employée car trop sophistiquée et trop coûteuse, seulement 1% en Thaïlande [Sakulrat, 2003]. Par contre, la valorisation matière et le compostage sont très répandus, bien qu'ils ne concernent qu'un faible pourcentage des déchets produits. La valorisation matière se fait traditionnellement par le secteur informel.

Le coût du procédé de traitement est un indicateur non négligeable dans la prise de décision pour le choix d'un traitement. En moyenne, entre 10 à 50% du budget municipal sont consacrés au financement de la gestion des déchets [Van de Klundert & Anschutz, 2001; Cointreau Levine, 1996]. La population participe faiblement à la taxe d'enlèvement des déchets urbains. Ce système est encore mal intégré dans les habitudes culturelles des P.E.D. Au Maroc [O.N.E.M, 2001], l'absence de redevances spécifiques aux déchets est en partie responsable, du dysfonctionnement des collectivités

locales, qui ne peuvent assumer seules ces charges. Les ressources des collectivités locales ont plusieurs origines : taxes locales, partie de la TVA, emprunts. Le choix de l'un de ces traitements demande la mise en oeuvre d'études préliminaires, longues et coûteuses. De plus, il faut anticiper l'évolution du gisement, de sa composition et des variations spatiales comme temporelles de la quantité de déchets.

En conclusion, les filières de traitement les plus répandues dans les P.E.D sont le stockage et la valorisation matière pendant la collecte. Certaines de ces filières sont mal adaptées aux conditions spécifiques des P.E.D, par exemple, de par une forte humidité et un P.C.I faible des déchets, le traitement par incinération est inadapté. A cette considération technique, il est nécessaire d'ajouter le coût de traitement trop élevé. La mise en décharge est la méthode la plus répandue, mais il ne faut pas confondre dépôts sauvages au bord d'une route et mise en centre d'enfouissement technique. Cette dernière est adaptée pour tous les types de déchets, mais correspond également à une filière coûteuse. La valorisation matière par le biais du recyclage, réalisée « intuitivement » par les populations, offre un marché abondant en produits recyclés et à faible coût. Mais les initiatives organisées d'implantation de centre de tri sont très limitées.

Le choix d'une filière de valorisation matière comme le compostage, traitement à faible coût et à fort besoin en main-d'œuvre apparaît la solution la mieux adaptée pour les villes des P.E.D. L'obtention d'un produit de qualité est le garant de la pérennité de cette filière en assurant une bonne image du compost, donc des débouchés stables. Par conséquent, il est nécessaire de maîtriser le procédé de compostage dans chacune de ses étapes afin de s'assurer de la qualité du produit final.

Chapitre 2 : Généralités sur le compostage

Le compostage est un procédé ancestral de fabrication d'amendement organique. Le terme de compostage est familier à tout un chacun et évoque pour la plupart, un produit organique plus ou moins dégradé provenant d'un tas de déchets organiques au fond du jardin. Bien que ce procédé se réalise de lui-même dans la nature, le compost ainsi obtenu a des caractéristiques et des propriétés différentes en fonction de la nature du substrat et du déroulement de la fermentation. Ces transformations s'accompagnent de modifications physico-chimiques et microbiologiques, qu'il est nécessaire d'identifier afin de mieux les appréhender pour obtenir un compost de qualité. Cette notion de qualité doit être clairement définie afin que les producteurs et les utilisateurs soient capables de juger de la valeur du produit.

Ce chapitre présente les différentes phases d'élaboration du compost ainsi que les paramètres principaux régissant le processus de dégradation et leur évolution. La qualité du compost sera évoquée en terme de maturité et de teneur en métaux lourds.

I. Généralités

I.1. Définition

Le compostage est un mode de traitement biologique aérobie des déchets. Son principe peut-être schématisé de la manière présentée sur la Figure 2. Le compostage est qualifié de biologique par l'intervention des micro-organismes dans la dégradation de la matière organique contenue dans les déchets et d'hygiénique par la montée en température détruisant les germes pathogènes et les virus. Quelques semaines à quelques mois de décomposition naturelle convertissent les déchets organiques en un produit, le compost, pouvant être utilisé pour la fertilisation des terres agricoles.

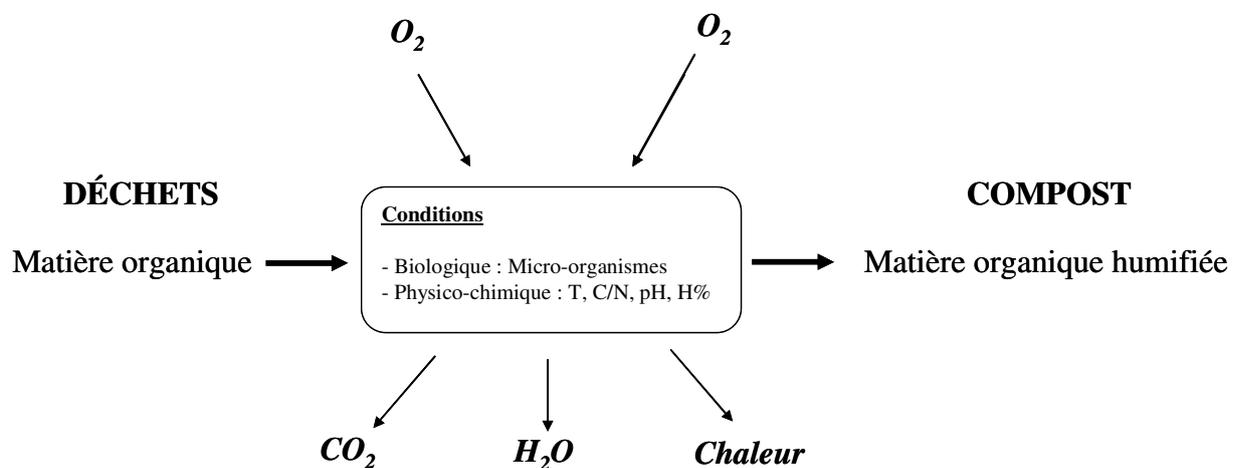


Figure 2 : Processus de compostage

Le processus de compostage se réalise en plusieurs phases dont la première est la fermentation : une dégradation rapide de la matière organique fraîche et facilement biodégradable en molécules moins complexes comme les sucres ou les polymères. La seconde phase, la maturation, plus lente correspond à la mise en jeu des processus d'humification.

I.2. Avantages du compost

Le compostage est une technique très ancienne visant à valoriser les déchets organiques pour les réutiliser sous forme d'humus. Cette valorisation permet de boucler les cycles naturels et d'améliorer la productivité du sol. L'épandage d'un amendement organique laisse espérer des effets positifs sur le sol.

- **L'amélioration de la structure** et de la stabilité structurale du sol. En effet, parmi les différents éléments minéraux présents dans le sol, les argiles s'associent à la matière organique du sol (l'humus) et

aux micro-organismes pour former, sous l'action stabilisatrice du calcium, le complexe argilo-humique. Sa structure en feuillet lui confère une puissante charge négative permettant à une certaine quantité de cations libres de la solution du sol de s'y fixer (Ca^{2+} , K^+ , H^+ , Na^+ etc.). Le complexe argilo-humique est ainsi un véritable réservoir d'éléments nutritifs pour la culture. La formation d'agrégats stables rend ainsi le sol plus résistant à l'influence éolienne et hydrique, par conséquent, moins soumis à l'érosion.

- La **réétention d'eau** et la porosité. L'eau disponible pour les végétaux grâce à l'utilisation d'un compost correspond au double du volume d'eau pouvant être retenue par un sol minéral. Ainsi en augmentant le taux d'humus du sol de 0,2 %, la quantité d'eau disponible pour la plante croît de 0,5 % et la porosité du sol de 1%. L'amélioration de la porosité entraîne également une meilleure aération du sol et ainsi le développement de l'activité biologique.

- L'**influence sur la chimie du sol**. Les substances basiques du compost et les substances humiques sont bénéfiques contre l'acidification du sol et le stabilisent chimiquement. Une revitalisation des sols fortement dégradés et un développement de la végétation sont favorisés.

- L'**effet phytosanitaire** décrit la faculté fongicide du compost. D'une manière générale le compost contient des substances donnant plus de vigueur aux végétaux et augmentant ainsi leur résistance vis à vis de certains pathogènes.

II. Principaux paramètres du compostage

Le phénomène de compostage a lieu spontanément dans le milieu naturel, de façon non optimale, avec une répartition de la chaleur trop hétérogène. Pour utiliser ce procédé à l'échelle industrielle, il est donc nécessaire de connaître parfaitement les différents facteurs physico-chimiques et microbiologiques intervenants. Deux principales catégories de paramètres interviennent lors du procédé de compostage :

- les paramètres liés à la nature et à la composition même du substrat. La teneur en eau, le pH, le rapport Carbone/Azote (C/N) ainsi que la granulométrie en font partie.
- les paramètres de suivi du procédé : la température, la présence d'oxygène et également la teneur en eau.

Certains paramètres comme la teneur en M.O.T, la valeur agronomique et la toxicité du compost interviennent dans la qualité du compost, et seront développés dans une autre partie.

Les différentes techniques de compostage permettent d'améliorer et d'accélérer le processus de dégradation naturelle des matières fermentescibles. Pour ce faire, on cherche à "doper" l'activité des micro-organismes en optimisant l'offre en substances nutritives et en régulant les conditions de pH, de température, d'humidité et d'aération.

II.1. Micro-organismes

Le processus de compostage correspond à une fermentation aérobie, faisant intervenir une multitude de micro-organismes. Ces derniers varient d'une part au cours des phases du procédé et d'autre part en fonction de la nature du substrat. De nombreuses études identifient certains de ces micro-organismes (pathogènes ou non) participant à la dégradation de la matière organique lors du procédé de compostage [Deloraine *et al* 2002 ; Abdennaceur *et al*, 2001 ; Déportes *et al*, 1995] ou présents dans le compost [Lucero-Ramirez, 2000 ; Tuomela *et al*, 2000].

Cinq types d'organismes sont principalement rencontrés lors du processus de compostage : les virus, les bactéries, les parasites (regroupant les protozoaires), les helminthes et les champignons. La survie de ces organismes dans le milieu extérieur dépend de la température, de la disponibilité en eau et en oxygène, et également de la présence d'autres organismes saprophytes. Les plus actifs font partie de la microflore. Les bactéries mésophiles se développent en premier et sont présentes tout au long du procédé. Les champignons et les moisissures supportent mal les hautes températures et une teneur élevée en eau. Ils sont essentiellement actifs pendant la phase de maturation et sont responsables de la dégradation des polymères complexes. Les actinomycètes apparaissent essentiellement lors de la phase thermophile et celle de maturation [Mustin, 1987].

II.2. Paramètres physico-chimiques

Un procédé de compostage optimal correspond à une fermentation réalisée dans les conditions les plus propices au développement de la flore bactérienne. Pour vérifier ces conditions, les principaux paramètres à suivre pendant le procédé sont les suivants :

II.2.1. pH

Le pH des suspensions de solides (déchets, compost) varie entre 5 et 9. Une phase acidogène se produit au début du processus de dégradation : production d'acides organiques et de dioxyde de carbone (CO₂) par les bactéries acidogènes, décomposeurs du matériel carbone complexe, provoquant ainsi une diminution du pH initial. La seconde phase correspond à une alcalinisation : hydrolyse bactérienne de l'azote avec production d'ammoniac (NH₃) associée à la dégradation de protéines et à la décomposition d'acides organiques [Haug, 1993 ; Mustin, 1987].

Le pH optimal se situe donc vers la neutralité en fonction de la nature du substrat [Damien, 2004]. Le suivi du pH est un indicateur du degré de décomposition biologique et biochimique. La première phase acidogène est difficilement observable comme l'indiquent les études de Canet & Pomares (1995) ou celles de Sanchez-Monedero *et al.* (2001).

II.2.2. Température

Une température minimale est nécessaire à l'activité des micro-organismes et à la dégradation. Venglovsky *et al.*, (2005) rapportent selon Stentiford (1996) qu'une température supérieure à 55°C permet l'hygiénisation, entre 45 et 55°C, elle favorise la biodégradation et qu'entre 35 et 40°C elle améliore la diversité des micro-organismes. Une température voisine de 20°C ou supérieure à 82°C inhibe, voire arrête cette activité microbienne [Liang *et al.*, 2003].

Le suivi de la température est une mesure indirecte de l'intensité des dégradations. Il renseigne également sur la qualité du processus de dégradation : un épuisement en oxygène peut ainsi être décelé puis corrigé par des apports complémentaires (retournement). De plus, ce suivi caractérise au début du processus la qualité du mélange. Les variations des montées en température sont fonction de l'aération et de la composition du substrat. Le Tableau 10 indique le type de bactéries détruites en fonction de la température atteinte lors du procédé.

Tableau 10 : Température et durée d'exposition nécessaire à la destruction de pathogènes [Noble & Roberts, 2003 ; Lucero-Ramirez, 2000 ; Golueke, 1991 dans Déportes, 1995]

Type de micro-organismes	Température et durée nécessaire à sa destruction
<i>Ascaris lumbricoides</i>	4h à 60°C ou 1h à 65°C
<i>Salomonella spp</i>	15-20 min à 60°C ou 1h à 55°C
<i>Escherichia coli</i>	15-20 min à 60°C ou 1h à 55°C
<i>Taenia saginata</i>	5 min à 71°C
<i>Shigella spp</i>	1h à 55°C

Pour obtenir cette hygiénisation du compost, l'U.S.E.P.A (1994) recommande une température de 55°C au moins pendant 5 jours en compostage à l'air libre. Dans des réacteurs, la température doit dépasser 60°C pendant une semaine [Ademe, 1998]. Les conditions optimales pour une hygiénisation dépendent de la nature du procédé et de la durée de maintien de la température [Martens, 2005]. En pratique un produit est dit hygiénisé après 15 jours à une température supérieure à 55°C ou une semaine à 65°C pour des systèmes à l'air libre, ou 7 jours en aération forcée pour des températures supérieures à 60°C [W.R.A.P, 2004]. Mais même avec une montée en température suffisante, il existe un risque pour le compost de réinfection dû à l'action de certains pathogènes en état de latence [Hamer, 2003].

II.2.3. Teneur en humidité

La teneur en eau (H%) du substrat conditionne l'activité des micro-organismes. La teneur optimale dépend de la densité du milieu, qui est fonction de l'état physique et de la nature du substrat. Elle est sensible à deux phénomènes ayant des effets complémentaires : d'une part, la dégradation de la

matière organique provoquant une libération d'eau et d'autre part, une évaporation de l'eau sous l'effet de l'énergie calorifique libérée par la fermentation.

La décomposition de la matière organique est inhibée si la teneur en eau baisse en dessous de 20%. Au contraire, si elle dépasse 70%, l'eau commence à remplir les espaces lacunaires des déchets et empêche les échanges d'oxygène, provoquant des conditions favorables à l'anaérobiose. Selon certains auteurs [Tiquia *et al.*, 1998 ; Haug, 1993 ; Mustin, 1987 ;] l'optimum de teneur en eau se situe entre 40% et 60%. En fin de procédé, un produit sec ou presque facilite la finition mécanique du compost en évitant un colmatage des équipements.

Le pH, la température et l'humidité sont des paramètres interdépendants et difficilement dissociables. Les auteurs s'accordent pour donner des valeurs optimales de ces paramètres. Liang *et al.* (2003) étudient plus spécifiquement les effets de deux paramètres, l'humidité et la température de dégradation des biodéchets. L'humidité semble être le paramètre ayant la plus grande influence. Cela suggère un contrôle du procédé par l'humidité et non comme habituellement par la température. D'autres études insistent sur les valeurs de pH et de température au cours du procédé ou sur le compost lui-même [Smars *et al.*, 2002 ; Sundberg *et al.*, 2004]. Ces paramètres sont optimaux lorsqu'ils permettent une hygiénisation du produit, une vitesse de dégradation rapide et une humidification suffisamment active. Ils sont fonction de la nature du substrat et des conditions particulières de mise en œuvre du procédé.

II.2.4. Rapport Carbone/Azote

Les bactéries utilisent le carbone comme source d'énergie et l'azote comme source protéique. Le procédé de compostage entraîne une décomposition de la M.O, donc une consommation de l'azote et du carbone, correspondant à la diminution du rapport C/N. Ce rapport exprime la proportion entre le carbone et l'azote bio-disponible. Il dépend de la composition intrinsèque du substrat à composter comme le montre le Tableau 11.

Tableau 11 : Rapport C/N de divers substrats [Mustin, 1987 ; Gootas, 1959, www.ademe.fr]

<i>Matières</i>	<i>Rapport C/N</i>
Urines	0,8
Gazon coupé	12
Tabac	13
Légumes	12-30
Ordures ménagères	25
Papiers- cartons	70
Branches arbres	70
Paille de blés	128
Sciure de bois	200

De nombreux auteurs déterminent des valeurs optimales de ce rapport C/N qui peut varier de 107 à 18 en début de compostage. Par exemple, il se situe entre 25 et 45 pour les ordures ménagères hétérogènes [Sadaka *et al.*, 2003, Bernal *et al.*, 1998 a, Eggen & Verthe, 2001], alors que le rapport minimum C/N des déchets verts est proche de 30. La valeur de 35 ne doit pas être dépassée pour les déchets urbains, sinon les micro-organismes passent par plus de cycles d'oxydation pour atteindre la valeur optimale dans le compost. De même, si ce rapport est trop faible, une perte excessive en azote ammoniacal risque d'entraîner une diminution du pH.

Il est donc important de connaître le rapport C/N initial des déchets afin de constituer un mélange optimal en ajoutant la quantité d'éléments déficitaires pour assurer une dégradation idéale et homogène sur l'ensemble du processus.

II.2.5. Teneur en Matière Organique Totale

La minéralisation du compost correspond à une diminution de la M.O.T au cours de la dégradation biologique du substrat [Houot a, 2002]. Cette diminution est variable et dépend des conditions de réalisation du processus de dégradation mais également de la durée du procédé. Les pertes en M.O.T au cours du procédé peuvent atteindre 20 à 60% en poids de la M.O.T initiale [Iannatti *et al.*, 1994 ; Canet & Pomares, 1995 ; Atkinson *et al.*, 1996].

II.2.6. Apport d'oxygène

L'oxygène est utilisé par les micro-organismes comme un récepteur terminal d'électrons lors de la respiration aérobie et de l'oxydation des substances organiques [Waas, 1996]. La présence d'oxygène est indispensable au bon déroulement du compostage pour maintenir les conditions aérobies nécessaires à une décomposition rapide et inodore. La teneur en oxygène lacunaire représente le pourcentage d'oxygène dans l'air des vides entre les particules de compost.

Ce taux est fonction de la granulométrie et de l'humidité des particules comme du renouvellement de l'air des lacunes. Au fur et à mesure de la dégradation du substrat, le besoin en oxygène diminue [Mustin, 1987, Haug, 1993]. Si la teneur en oxygène est trop faible ou la masse à composter trop compacte, les conditions favorables à l'anaérobiose se mettent en place. Ce type de fermentation aboutit à un produit stabilisé mais par le biais d'un processus plus lent avec dégagement d'odeurs nauséabondes.

Les systèmes d'aération sont divers et variés : retournements mécaniques, aération forcée ou pilotée, avec ou sans recirculation [Bari, 2001 ; Illmer & Schinner, 1996]. L'apport d'oxygène réduit l'humidité initiale (si elle est trop forte), améliore l'homogénéité du substrat et diminue une possible élévation de température.

II.2.7. Granulométrie

La granulométrie est un facteur qui détermine la vitesse de biodégradabilité. Plus la surface spécifique du substrat sera élevée, plus la zone de contact entre le substrat et les micro-organismes, sera étendue et meilleure sera la fermentation. Une granulométrie trop fine induit un espace poral trop réduit et diminue l'accès puis la circulation de l'air : « étouffement » du compost. *A contrario* si la granulométrie est trop élevée, les apports en oxygène vont dépasser les teneurs optimales, asséchant le compost, et la montée en température se réalisera difficilement. La granulométrie du substrat évolue au cours du processus de dégradation par fragmentation des agrégats vers des éléments fins. Elle peut-être modifiée par l'emploi de broyeur ou de cribleur.

En conclusion, l'identification des principaux paramètres physico-chimiques est nécessaire pour optimiser puis améliorer l'efficacité du procédé. De la caractérisation physico-chimique du substrat va découler le réajustement des conditions du procédé : ajout d'eau, fréquences des retournements. Au cours du procédé, un contrôle des paramètres principaux permet non seulement de connaître le stade de dégradation du compost mais aussi d'avoir une idée du bon déroulement du processus.

Dans la pratique, les conditions de dégradation rapides et contrôlées dépendent du système de fermentation employé. Le Tableau 12 représente ces caractéristiques pour un système classique en andain avec retournement mécanique.

Tableau 12 : Paramètres de contrôle et de suivi du procédé

<i>Paramètres</i>	<i>Phase initiale</i>	<i>Compost mûr</i>
Rapport C/N	20 à 40	10-15
Humidité (%)	40 à 65	35-45
Température (°C)		< 40
pH	5 – 8	7
Structurants (%)	> 15	
MO (%MS)	40 – 70	> 40
Granulométrie (cm)	~ 1 en aération forcée 3 - 10 sans aération forcée	Dépend du criblage

Il reste très difficile de définir avec précision les valeurs optimales pour chaque paramètre. En effet, ceux-ci dépendent de la composition intrinsèque du substrat, variant en fonction des conditions socio-économiques et du mode de vie de chaque pays. Ces paramètres s'équilibrent au cours du procédé : le dépassement de la valeur de l'un sera compensé par la valeur de l'autre. Certains paramètres comme la température, ou l'humidité sont également fonction de la technologie du procédé. En pratique, il est nécessaire de trouver un compromis entre la théorie et les contraintes de terrain.

III. Qualité du compost

Le compost est essentiellement utilisé comme amendement organique pour améliorer la qualité des sols et les rendements de production des cultures. Il doit correspondre à des standards de qualité répondant eux-mêmes aux exigences des consommateurs et du marché. En l'absence de critères de qualité et de systèmes d'assurance qualité définis par la législation des P.E.D, ceux réglementés dans les P.I sont quelques fois pris comme référence [Bionet, 2002]. La qualité obtenue est surtout conditionnée par la nature des produits initiaux et le suivi des paramètres physico-chimiques. Il est indispensable de tenir compte de certaines exigences pour ne pas porter préjudice à la commercialisation du produit comme :

- le caractère inoffensif du point de vue pathogène,
- la compatibilité avec les plantes,
- l'absence d'impuretés (plastiques, verres...),
- la teneur en matières fertilisantes (N, P, K, Ca),
- la teneur en polluants potentiels (métaux lourds),
- le suivi de la qualité du produit.

III.1. Maturité et stabilité du compost

La qualité du compost est fonction du degré de stabilisation de la M.O [Houot, 2003]. Il est donc essentiel de déterminer le degré de maturité du produit c'est à dire le stade à partir duquel le compost n'entraîne plus d'effet négatif sur les végétaux [Nicolardot, 1982].

Les termes maturité et stabilité d'un compost sont souvent confondus et employés dans un même sens alors qu'ils correspondent à des paramètres différents. Il n'existe pas de définition universelle pour ces paramètres et de nombreux auteurs proposent leur propre définition. Une étude effectuée par A.D.A.S Consulting Limited (2005) recense les diverses définitions proposées dans la littérature. Ainsi le terme de stabilité est défini par 12 paramètres parmi 49 références bibliographiques et la maturité selon 7 paramètres parmi 44 références. La répartition de ces termes recueillis dans la littérature est récapitulée le Tableau 13.

Tableau 13 : Paramètres de stabilité et de maturité (en % d'apparition dans la littérature) [A.D.A.S Consulting Limited, 2005]

<i>Stabilité</i>	<i>%</i>	<i>Maturité</i>	<i>%</i>
Activité biologique ou respiration	35	Effets sur les plantes	45
Degrés ou stades de décomposition	20	Degrés de décomposition (C/N)	23
Mauvaises odeurs	14	Activité biologique ou respiration	11
Consommation d'azote	8	Bénéfices agraires (texture, rétention en eau...)	9
Disponibilité des nutriments	6	Odeurs	9
Phyto-toxicité	4	Pathogènes	4
Carbone disponible ou autres sources	2	Couleur	2
Couleur	2		
Dissolution des métaux lourds	2		
Humidité	2		
Risques environnementaux pour la santé	2		
Texture	2		
	100		100

La maturité d'un compost est le plus souvent associée à la germination et à la croissance des plantes incluant la phyto-toxicité, l'immobilisation de l'azote et la balance des nutriments [Brinton, 2001 ; Bernal *et al.*, 1998 b] alors que la stabilité combine l'activité microbienne et le degré de décomposition du substrat [Haug, 1993 ; Bernal *et al.*, 1998 b]. Dans la suite de cette étude, les termes de stabilité ou de maturité seront indifféremment employés pour qualifier la qualité du compost.

La maturité est souvent évaluée par le rapport C/N. Il a été établi par différents auteurs qu'un rapport C/N voisin de 10-15 correspond à un compost mature. Actuellement, ce rapport seul n'est plus suffisant pour déterminer la maturité d'un compost, il est nécessaire de le combiner avec d'autres paramètres physico-chimiques tels que la M.O.T%, des tests de phyto-toxicité [Goyal *et al.*, 2005 ; Domeizeil *et al.*, 2004 ; Eggen & Vethe, 2001 ; Ranalli *et al.*, 2001].

De nombreux auteurs se sont intéressés aux méthodes d'évaluation de la maturité et les ont comparées entre elles [A.D.A.S Consulting Limited, 2005 ; Francou, 2003 ; Avnimelech *et al.*, 1996 ; Morel *et al.*, 1986 ; Godden, 1986]. Aucune n'a été retenue comme la méthode de référence, bien souvent plusieurs analyses biologiques, chimiques ou physiques complémentaires sont préconisées. Les méthodes d'appréciation de la maturité sont basées sur l'état de stabilité de la M.O et ses conséquences sur l'activité microbienne des composts et des sols [Houot, 2003].

III.2. Indicateurs de maturité

De très nombreuses méthodes d'évaluation de la maturité existent allant des plus rudimentaires au plus sophistiquées. Une première approche sensorielle permet de juger de son stade de maturité. Il doit ressembler à du terreau tant par sa **couleur** « noire foncée » que par son absence **odeur** désagréable

[Mbuligwe *et al.*, 2002 ; Iglesias-Jimenez & Perez-Garcia, 1989]. Sa **température** en fin de processus doit être stable et voisine de la température ambiante extérieure sans excéder 35°C [Harada *et al.*, 1981] et au toucher sa **texture** doit être friable. Ces méthodes rapides et simples doivent être complétées par des analyses plus précises en laboratoire.

III.2.1. Indicateurs physiques

La plupart des paramètres physiques, qualitatifs, renseignent sur le stade de fermentation plutôt que sur le degré de maturité du compost. La **densité optique** du compost sous forme solide ou après mise en solution dans l'eau, permet de détecter la présence de différents composants comme les substances humiques à 280 nm [Morel, 1982], ou le taux d'humification en fonction du ou des rapports des absorbances obtenues à 280, 472, 664 nm [Zbytniewski, 2005 a]. Certaines méthodes purement qualitatives, comparent l'allure du spectre obtenu ou du comportement thermique du compost à celui d'un substrat spécifique. Par exemple, l'analyse à l'**infrarouge** (IR) non destructive et rapide, caractérise les principaux groupes fonctionnels de matrices complexes [Castaldi *et al.*, 2005 ; Melis & Castaldi, 2004 ; Ranalli *et al.*, 2001 ; Hsu & Lo, 1999], les méthodes **calorimétriques** comparent le comportement thermique [Pietro & Paola, 2004 ; Critter *et al.*, 2004 ; Rannalli *et al.*, 2001], la **fluorescence** [Provenzano, 1998] ou la résonance magnétique nucléaire (**RMN**) du carbone 13 [Matejka *et al.*, 1994]. Le substrat spécifique est choisi pour ses caractéristiques physiques proches du compost : un sol riche en acide humique ou acide fulvique. Leur comparaison vérifie une complexification des molécules, donc l'humification du compost et par voie de conséquence, le bon déroulement du processus d'humification. Aucune référence n'est préconisée par ces méthodes qui dépendent toutes de la nature du substrat initial [Domeizel, 2004].

Une étude de Weppen (2001) préconise l'installation de mesures par calorimétrie en ligne *via* des systèmes automatisés afin de vérifier, en temps réel, le suivi de l'humification du procédé. Ces méthodes montrent les changements physiques d'un même substrat au cours de la dégradation biologique. Elles permettent également de rapprocher le compost à un substrat retenu pour ses propriétés spécifiques.

III.2.2. Indicateurs chimiques

La majorité des études, relatives au degré de maturité des composts, se base sur l'évolution des paramètres physico-chimiques globaux : pH, rapport C/N et rapport $N-NO_3^-/N-NH_4^+$, capacité d'échange cationique (C.E.C) ...

Les **pH** acides sont caractéristiques des composts immatures. Les composts matures ont un pH voisin de la neutralité ou supérieur (entre 7 et 9) [Avnimelech *et al.*, 1996].

Le processus d'humification produit des groupes fonctionnels et augmente l'oxydation de la M.O, provoquant un accroissement de la **capacité d'échange cationique** (C.E.C). Le suivi de ce paramètre permet également l'appréciation de la maturité d'un compost. Harada & Inoko (1980) proposent une valeur de C.E.C supérieure à 60 mg eq/ 100 g de compost et Bernal (1998) montre que cet indice est valable uniquement pour un compost d'ordures ménagères.

Le **rapport C/N** est le paramètre le plus communément mesuré pour évaluer la maturité d'un compost. Il peut-être déterminé en phase solide comme en phase liquide lors d'une mise en contact avec de l'eau [Bernal, 1998]. Un rapport C/N inférieur à 12 en phase solide est considéré comme un indicateur de maturité pour le compost [Iglesias-Jimenez & Pérez-Garcia, 1993]. Ce rapport, fréquemment retrouvé, est rapproché au rapport C/N, proche de 10, des sols humiques. L'ajout d'un compost mature (C/N<15) dans le sol n'altère pas l'équilibre microbiologique du sol [Bernal, 1998].

La majorité de **l'azote** contenu dans le compost est d'origine organique et sous forme de protéines ou de peptides simples. Une faible quantité des ions nitrate est minéralisée en ions ammonium par une réaction d'ammonification résultante du développement de l'activité bactérienne. Les ions ainsi formés vont réagir différemment en fonction de la nature du substrat : ils sont immobilisés par les micro-organismes, puis transformés en azote organique, ou ils sont volatilisés, puis dégazés lors d'une augmentation de température [Sanchez-Monedero *et al.*, 2001]. Une étude de Sanchez-Monedero (2001) conclut que la perte d'azote dans un compost d'ordures ménagères est proche de 40% et qu'un rapport $[N-NH_4]/[N-NO_3]$ inférieur ou égal à 0,11% correspond à un indicateur de maturité pour ce type de compost. L'azote organique des composts stabilisés, se minéralise lentement, avec une vitesse similaire à celle des sols (0,26 mg N/kg/j) sans évolution avec l'âge du compost. Pour les composts moins stables, la vitesse de minéralisation est supérieure (0,4 mg N/kg/j) [Houot, 2002]. La qualité du compost est également évaluée par le suivi de l'azote. En effet, les micro-organismes nitrifient le substrat, se traduisant par une diminution de la concentration en $[NH_4^+]$ et une apparition d'ions nitrate. Zucconi & De Bertoldi (1987) fixent la limite de stabilité d'un compost d'O.M pour une concentration en $[NH_4^+]$ voisine de 0,04% soit 400 mg/kg. [Bernal, 1998]

III.2.3. Indicateurs biologiques

Les tests biologiques d'évaluation de l'état de maturité du compost sont divers. Certains sont basés sur la présence des différentes formes de la M.O dans le compost, d'autres mesurent les effets nuisibles sur les plantes : les tests de phyto-toxicité. Une dernière catégorie est basée sur la détermination de l'activité respiratoire des micro-organismes dans le compost par la mesure de l'oxygène consommé ou du dioxyde de carbone produit.

III.2.3.1. Tests de phyto-toxicité

Les tests de phyto-toxicité sont les seuls moyens pour évaluer la toxicité d'un compost dans les sols [De Bertoldi, 1993]. Un compost immature contient des produits phyto-toxiques comme les acides phénoliques ou les acides gras volatils [Kirchmann & Widen, 1994 dans Bernal, 1998]. De nombreux tests de phyto-toxicité évaluent la maturité d'un compost mais les plus fréquemment retrouvés dans la littérature et la pratique sont les :

- Tests de croissance de plantes [Helfrich *et al.*, 1998 ; Garcia *et al.*, 1992 ; Hirai *et al.*, 1986],
- Tests de germination [Garcia *et al.*, 1992 ; Wu *et al.*, 2000],
- Test de développement racinaire [Brinton & Evans, 2000].

Ces tests sont réalisés sur des végétaux (cresson, tabac...), et le compost est appliqué en mélange avec de la tourbe en quantités variables allant de 0 à 100%. Les causes de phyto-toxicité sur les plantes sont nombreuses : immobilisation de l'azote dans le sol, échauffement racinaire, présence d'acides organiques, de pathogènes ou de métaux. Plusieurs études montrent que la stabilité du compost entraîne une diminution de la phyto-toxicité. [Garcia *et al.*, 1992 ; Iglesias-Jimenez & Perez-Garcia, 1989 ; Hirai *et al.* 1986]. Le test le plus répandu est celui de la germination de Spohn (1968), test normalisé XPU 44-165 de 2004. La germination de graines de cresson est suivie dans un mélange (1/3, 2/3) de compost et de tourbe, cette dernière servant également de témoin. La maturité est évaluée après 7 jours suivant le pourcentage de germination et la quantité de biomasse produite par rapport au témoin.

L'activité microbiologique peut-être un indicateur de la stabilité du compost. Chaque étape du compostage est caractérisée par une microflore spécifique. Différents tests permettent d'évaluer cette microflore spécifique comme la croissance de *Chaetomium thermophile* ou de *Verticilium alboatrum*, par comptage de la biomasse microbiologique [Morel *et al.*, 1986]. Ces tests de comptage sont peu pratiqués en raison de leur complexité et de leur de mise en œuvre très longue.

III.2.3.2. Tests respirométriques

Ils reposent sur la mesure de l'activité respiratoire des micro-organismes présents dans le compost dans des conditions spécifiques d'incubation (humidité, température). Un compost non mûr a une demande en O₂ et un taux de production de CO₂ importants, dus à une intense activité microbienne provoquée par la biodégradabilité du substrat [Bernal, 1998]. De nombreuses méthodes respirométriques existent des plus rudimentaires [Nicolardot, 1982] aux plus sophistiquées et mécanisées.

La méthode S.O.U.R (Specific oxygen uptake rate) est souvent citée et correspond à une mesure par sonde des variations de concentration en O₂, dans une solution aqueuse de compost. Le S.O.U.R

correspond au taux maximum d'O₂ consommé, exprimé en mg O₂/gVS/h. L'avantage de cette méthode réside dans l'utilisation de matériel courant de laboratoire. Une méthode similaire est employée mais sur produit sec (D.S.O.U.R pour Dry Specific Oxygen Uptake Rate) [Lasaridi & Stentiford, 1998].

D'autres tests existent dans des conditions opératoires différentes, c'est pourquoi, donner des chiffres de référence sans en attribuer la méthode, n'est pas significatif. Les mesures directes de l'activité des micro-organismes, sont les plus fiables selon certains auteurs [Rynk, 2003]. Pourtant, aucun de ces tests n'est retenu comme référence en matière d'indicateur de maturité du compost.

III.2.3.3. Tests d'auto-échauffement

Une des conséquences de l'intense activité des micro-organismes est la production de chaleur lors de la dégradation de la M.O. Le degré de décomposition de celle-ci peut donc être évalué par son aptitude à remonter en température (auto-échauffement). Ce test d'auto-échauffement, développé en Europe, est recommandé par l'organisme de normalisation allemande (Bundes Gütegemeinschaft Kompost BGK) [F.C.Q.A.O, 1994] puis aux Etats-Unis [05.08 D Respirometry U.S.D.A, 2002]. Le compost est placé dans des conditions spécifiques de température, d'humidité et en enceinte thermostatée à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ à l'intérieur d'un vase Dewar. La température est suivie pendant 10 jours. L'indice de maturité est fonction de la plus haute température atteinte lors du test. Ce dernier est qualifié de :

- **mûr** pour un degré de maturation de V (temp. < 30°C) ou un degré de IV (temp. < 40°C),
- **compost frais** pour un degré de maturation degré III (temp. < 50°C) ou de II (temp. < 60°C).

Des expériences comparatives sur 27 composts d'origine différente ont permis de comparer la méthode d'auto-échauffement avec deux autres méthodes standardisées et d'en valider les résultats [Körner *et al.*, 2003].

III.2.3.4. Tests colorimétriques

Cette méthode colorimétrique repose sur le virage d'indicateurs colorés mesurant simultanément la volatilisation de NH₃ et le dégagement de CO₂ à partir d'un échantillon de compost placé dans une enceinte hermétique, dans des conditions spécifiques d'humidité. Ce test nommé Solvita® est développé par le Woods Research® Management, USA [W.E.R.L.]. Les résultats sont disponibles en 4 heures par comparaison avec une échelle de valeur colorimétrique de maturité. L'échelle allant de 1 pour les composts frais à 8 pour les composts mûrs. Ce test est officiellement recommandé aux Etats-Unis [05.08 E Respirometry U.S.D.A, 2002], au Danemark, en Norvège et en Suède. De récentes études indiquent que la lecture des résultats est fonction de l'appréciation colorimétrique des manipulateurs. Ce test reste sensible à l'ajustement en eau, mais ne nécessite *a priori* pas de durée de mise en équilibre avant utilisation comme le préconise le mode d'emploi [Francou, 2003].

En conclusion, d'autres méthodes d'évaluation de l'activité des micro-organismes sont envisageables comme les mesures des activités enzymatiques. Certaines méthodes appliquées au sol ont été transférées sur le compost comme la mesure de la phosphatase alcaline, l'invertase (ou saccharase), les catalases ou l'A.T.P (Adénosine TriPhosphate) [Godden, 1986]. Cette dernière traduit l'activité de la biomasse, son suivi permet d'apprécier le stade et l'évolution de la dégradation au cours du compostage. Sa teneur est forte au cours de la phase mésophile, de l'ordre de 10 $\mu\text{g A.T.P/g MS}$, puis elle baisse jusqu'à 0,1 $\mu\text{g A.T.P/g MS}$ pendant la phase thermophile et celle de maturation. Mais l'application de ces méthodes est problématique sur site.

Le test d'auto-échauffement, comparé au test colorimétrique, permet d'atteindre une sensibilité plus grande, dans la différenciation des classes des composts mûrs et stabilisés. Ces tests sont de plus en plus souvent comparés et corrélés avec les tests de laboratoire (pH, teneur en eau, en carbone, en azote total, et ammoniacal...) [A.D.A.S Consulting Limited, 2005 ; Copper, 2004 ; Wang *et al.*, 2004 ; Changa *et al.*; 2003 ; Brewer & Sullivan, 2003 ; Francou, 2003 ; C.C.Q.C, 2001]. Ces méthodes de terrain sont retenues par les exploitants pour leur facilité d'interprétation, leur simplicité de mise en œuvre. Elles donnent une indication relativement précise et fiable de l'état de maturité du compost.

Une grande variété de méthodes analytiques existe, fournissant une multitude d'indicateurs comme le montre le Tableau 14. Chaque auteur développe une technique d'évaluation de la maturité et avec elle ses indicateurs. Il devient alors très difficile de choisir une référence parmi tous ces indicateurs. Bien souvent plusieurs paramètres sont nécessaires à la détermination de la maturité du compost.

Tableau 14 : Synthèse bibliographique des principaux indicateurs de maturité

Paramètres	Tests / Analyses	Valeurs compost immature	Valeurs compost mature	Références
Physique	Température			(Harada <i>et al.</i> , 1981; Kapetanios <i>et al.</i> , 1993)
	Odeur			(Iglesias-Jimenez & Perez-Garcia, 1989)
	Couleur Calorimétrie			(Morel, 1982) (Provenzano <i>et al.</i> , 1998, Ranalli <i>et al.</i> , 2001, Pietro & Poala, 2004, Weppen, 2001)
Spectrales	RMN - C¹³			(Deiana <i>et al.</i> , 1990; Chen, 2003)
	Infrarouge			(Provenzano <i>et al.</i> , 1998), Chen, 2003)
Chimique	pH	6,7	8	(Avnimelech <i>et al.</i> , 1996, Bernal <i>et al.</i> , 1998 b)
		7 (initial)		(Iannotti <i>et al.</i> , 1994)
		/	7 8,4	(Iglesias-Jimenez & Alvarez, 1993)
	C/N solide	19.3	7.8	(Iglesias-Jimenez & Alvarez, 1993)
		15 à 26	10	(Gagnon <i>et al.</i> , 1997)
		20 (initial)	12	(Iannotti <i>et al.</i> , 1994)
		- 13.9-	< 15-20 10.8	(Iglesias-Jimenez & Perez-Garcia, 1989) (Jedidi <i>et al.</i> , 1995)
	NO₃⁻/NH₄⁺	<1	1.4 et 6.8	(Forster <i>et al.</i> , 1993)
		-	> 1	(Senesi, 1989, cité par Serra-Wittling, 1995)
		-	> 6.3	(Sanchez-Monedero <i>et al.</i> , 2001)
C.E.C		>60meq/100g MS	(Iglesias-Jimenez & Alvarez, 1993)	
Activité microbienne	CO₂ ou O₂			(Adani <i>et al.</i> , 1995)
	Respirométrie	-	0.9 et 1.5 gC-CO ₂ /kg/j le 3 ^{ème} j	(Forster <i>et al.</i> , 1993)
		16 gC-CO ₂ /kg MS en 3 j (initial)	1.3g/kg MS en 3 j	(Iannotti <i>et al.</i> , 1994)
		>15 g O ₂ /kg MS en 7j	<7 g O ₂ /kg MS en 7j 80 mg O ₂ /kg/ms/h	(Nicolardot <i>et al.</i> , 1986)
	Enzyme			(Iannotti <i>et al.</i> , 1994)
	* Auto-échauffement	2	>4	(Forster <i>et al.</i> , 1993; Kostov <i>et al.</i> , 1994)
	* Solivita®	4	>6	(Brinton & Evans, 2001 ; Rytz, 2001)
Sur plantes	Germination			(Garcia <i>et al.</i> , 1992; Wu <i>et al.</i> , 2000)
	Croissance			(Brinton & Evans, 2000)

* correspond à du biodéchets

III.3. Teneur en métaux

L'évaluation de la maturité du compost est essentielle pour son application dans les sols et la détermination de sa qualité. Une distinction est réalisée dans certains pays entre les différentes qualités de composts : mature, frais ou mulch [B.G.K, 1998], comme indiqué dans le Tableau 15. Différents critères permettent de définir les classes de composts : la maturité et la stabilité, mais également les teneurs en métaux lourds, en inertes...

Tableau 15 : Nombres de classes de compost dans plusieurs pays [Hogg et al., 2002]

<i>Pays</i>	<i>Nombre de classes</i>	<i>Description des classes</i>
Allemagne	2	selon la teneur en métaux lourds
Australie	4	produit composté & produit pasteurisé, eux-mêmes subdivisés en mulch fin et mulch
Autriche	3	Classe A+, A & B
Canada	3	AA, A, B (selon MO% & teneurs en inertes)
France	2	Classe A & B
Luxembourg	2	frais & Mature
Pays bas	2	très bon et bon compost (selon la teneur en métaux lourds)

Ces classements ne sont utilisés que dans les P.I, où la réglementation et les critères de qualité sont stricts. La plupart des P.E.D ne possèdent pas de réglementation en matière de qualité de compost. Parmi les critères de qualité, la teneur en métaux lourds est toujours préconisée dans la réglementation. Le Tableau 16 regroupe les teneurs en éléments métalliques de différentes réglementations dans le P.I [Hogg et al., 2002, Bionet, 2002].

Tableau 16 : Limites normatives en métaux lourds (mg/kg MS) dans les composts

<i>Pays</i>	<i>Législatif</i>	<i>Classe</i>	<i>As</i>	<i>Cd</i>	<i>Cr_{tot}</i>	<i>Cu</i>	<i>Hg</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Zn</i>
<i>Allemagne</i>	Biowaste ordinance I		/	1	70	70	0,7	35	100	300
<i>Australie</i>	ARMCANZ*	Biowaste	20	3	400	200	1	60	200	250
<i>Autriche</i>	Compost ordinance	Classe A ⁺	/	0,7	70	70	0,4	25	45	200
		Classe A		1	70	150	0,7	60	120	500
		Classe B		3	250	500	3	100	200	1800
<i>Canada</i>	BNQ**	AA, A	13	3	210	100	0,8	62	150	500
<i>France</i>	NF U 44-051	Compost urbain	50	3	/	600	2	100	150	1500
<i>Pays-Bas</i>		Compost très propre	5	0,7	50	25	0,2	10	65	75
		Compost propre	15	1	50	60	0,3	20	100	200
<i>Ecolabel</i>	2001/688/EC		10	1	100	100	1	50	100	300

*A.R.M.C.A.N.Z : Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand,

**B.N.Q : Bureau de Normalisation du Québec

Une grande diversité est observée dans les tolérances de chaque pays : les teneurs en chrome total sont multipliées par dix entre les Pays-Bas et l'Australie, de même pour celles du zinc entre les Pays-Bas et l'Autriche. Les teneurs admissibles en cadmium et en mercure restent faibles, inférieures à 3 mg/kg quelque soit le pays. Ces limites réglementaires peuvent être rapprochées des teneurs en éléments métalliques contenus dans le compost produit dans les P.E.D comme le présente le Tableau 17.

Tableau 17 : Teneurs en métaux lourds dans plusieurs composts (mg/kg)

	Bénin [Soclo, 1999]	Guinée [Matejka <i>et al.</i> , 2001]	Indonésie [Hoornweg & Thomas, 1999]	Italie Pianamonti, 1997	Mali [Soumaré <i>et al.</i> , 2003]	Canada [Hoorweg & Thomas, 1999]	Autriche [Hoornweg & Thomas, 1999]
Cd	6,3	1,5	3	3,2	<LD	2,6	4
Cr	12,4	140	50	296	/	210	150
Cu	5,4	75	80	437	10	128	400
Pb	107	140	150	652	3,4	83	500
Zn	11	/	300	1228	110	315	1000
Hg	/	/	1	/	0,026	0,83	4
Ni	/	/	50	140	6,5	32	100
As	/	/	10	/	/	13	/

<LD : inférieure à la limite de détection

Les teneurs en métaux lourds dans le compost sont très variables d'un pays à l'autre. Les sources principales de métaux lourds dans les composts urbains sont souvent communs aux déchets urbains : piles (Hg, Zn, Pb, Cd), peintures (Cr, Cd, Pb), plastiques (Cd, Ni, Zn), papiers et cartons (Pb), composants électroniques (Pb, Cd), céramiques, cosmétiques [Miquel, 2001 ; Meoun & Le Clerc, 1999] C'est pourquoi l'extraction des éléments métalliques toxiques est une étape essentielle dans la filière de compostage puisqu'elle conditionne la teneur en métaux lourds, donc la qualité du compost.

III.4. Valeurs agronomiques

La qualité d'un compost se juge également sur son aptitude à améliorer la fertilité du sol. Le compost permet une faible mobilité des nutriments notamment de l'azote. Ceci signifie que la minéralisation du sol ne libérera que 5 à 20% de l'azote total du compost dans la première année. Cependant il assure par la suite une disponibilité continue en azote. Deux paramètres sont évalués : la capacité du compost à apporter des éléments nutritifs aux sols et sa valeur amendante. Un bon approvisionnement en oligo-éléments comme le phosphore, le potassium, le magnésium, et le calcium, est apporté par le compost de déchets urbains. Dans le Tableau 18 sont répertoriées les valeurs des oligo-éléments de plusieurs composts.

Tableau 18 : Qualité agronomique de plusieurs composts d'ordures ménagères

Références	Unités	Mali [Soumaré <i>et al.</i> , 2003]	Guinée [Matejka <i>et al.</i> , 2001]	Bénin [Soclo, 1999]	France [Bajon <i>et al.</i> , 1994]	Espagne [Pascual <i>et al.</i> , 1999]
pH	U pH	8,5	8,5	7,8	8	7,5
K₂O	mg/g	10,6	10,9	6,2	0,8	5,8
CaO	mg/g	90	57,5	54,6	3,4	/
MgO	mg/g	4,6	7,5	3,6	0,5	/
P₂O₅	mg/g	0,92	10,5	45,8	0,4	9,6
C/N	/	16,8	13,6	17,6	14,7	9,2

Au-delà de la qualité intrinsèque en éléments agronomiques du compost, la valeur amendante du compost est évaluée. Il s'agit de l'aptitude des composts à entretenir ou augmenter le stock de matière organique du sol. Différentes méthodes d'estimation de cette valeur existent comme la mise en place de dispositifs de végétation sous serre [Enda] et celles de dispositifs expérimentaux en champ, montrant le bénéfice des composts pour le sol comme pour les cultures [Rivero *et al.*, 2004 ; Houot *et al.*, 2004 ; Ademe, 2001 ; Nkana *et al.*, 1996]. Des tests comparatifs confirment le bénéfice du compost dans les cultures, appliqué seul ou conjointement avec des fertilisants chimiques ou du fumier. L'augmentation de la production de pomme de terre en Guinée [Matejka *et al.*, 2001] se situe aux alentours de 50% pour une application seule du compost, son utilisation conjointe avec un autre amendement ou fertilisant chimique, triple presque le rendement de production. Ces tests sont longs, complexes à mettre en œuvre donc rarement réalisés, mais profitables au long terme pour assurer l'image positive du compost d'ordures ménagères.

En conclusion, le compostage permet des modifications de l'ensemble des principaux paramètres physico-chimiques des matériaux initiaux. Peu de références bibliographiques étudient l'ensemble de ces paramètres et d'autant plus sur un même produit au cours de la chaîne de traitement. Les recherches ciblent le plus souvent quelques paramètres et analysent leurs corrélations. La recherche d'indicateurs simples, fiables, faciles à mettre en œuvre pour évaluer la qualité du compost doit être adaptée aux conditions de production dans les P.E.D. Le fonctionnement des installations est quasi identique à celui rencontré dans les P.I, à quelques modifications près selon les conditions spécifiques locales : climat, géographie étendue, quantité et composition des ordures ménagères. En dehors du choix des procédés industriels adaptés, il est nécessaire d'appréhender aussi les conditions en amont, la collecte des déchets et en aval, l'utilisation du compost en agriculture. Dans la plupart des cas, de nombreux exemples le démontrent, une mauvaise estimation des conditions amont et aval conduit à la fermeture de l'usine, quand évidemment la collecte n'est plus assurée ou mal évaluée en terme de qualité et de quantité de déchets ou lorsque le compost s'accumule dans l'usine par manque de débouchés.

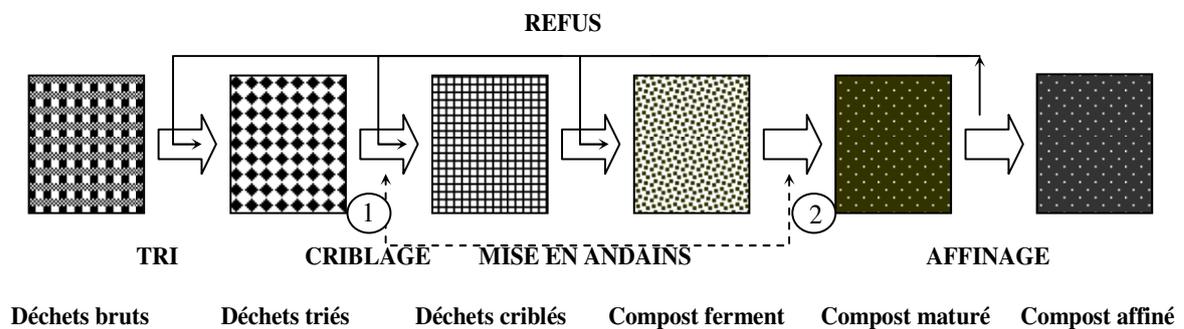
Chapitre 3 : Procédés de compostage dans les P.E.D

Le procédé de compostage est une succession de modifications physico-chimiques qui se réalisent spontanément dans le milieu naturel. L'utilisation d'un tel processus de dégradation dans l'industrie nécessite l'optimisation de tous ces paramètres afin d'obtenir une dégradation complète et rapide dans un minimum de temps. Pour cela, le compostage industriel se divise en plusieurs étapes mécaniques ou non, où chacune pourra faire l'objet d'optimisation en fonction des demandes et des conditions spécifiques de l'usine.

Ce chapitre introduit, puis compare les différents systèmes de compostage les plus fréquemment rencontrés dans les P.E.D.

I. Différentes étapes du compostage

Les techniques et les filières de traitement des déchets urbains par compostage sont décrits en détail par divers auteurs [Kreigh, 1994 ; Haug, 1993 ; Mustin, 1987]. Il est difficile de faire une description exhaustive et détaillée de tous les systèmes disponibles sur le marché. En effet, de nombreuses technologies sont employées et adaptées en fonction de la nature du substrat, de la capacité de traitement, des moyens financiers et de la taille de l'exploitation. Une multitude de procédés brevetés existent. Néanmoins les étapes techniques de base se retrouvent toujours, comme schématisées Figure 3.



1 et 2 : Position du criblage

Figure 3 : Schéma du procédé de compostage classique

Cette schématisation du procédé est indépendante du pays de son application. Dans les P.E.D, plusieurs types de filières existent, le compostage **traditionnel** à petite échelle, réalisé par les associations de quartiers, les O.N.G, de façon décentralisée, représente la majorité [Zurbrugg, 2004]. Le compostage traditionnel, centralisé et géré par les municipalités, est plus rarement rencontré. Le compostage **industriel** dans les villes à forte densité de population, où des systèmes de gestion des déchets existent, est plus complexe. La méthodologie d'expertise élaborée est ciblée sur cette dernière catégorie d'usine car leurs fonctionnements font intervenir plus de paramètres, donc plus de risques de dysfonctionnements.

I.1. Préparation du substrat

La qualité des matériaux organiques à composter est une condition indispensable pour un compost de qualité. Les expériences de compostage de déchets urbains en provenance d'une collecte non sélective ont démontré, qu'il est difficile de produire un compost conforme aux normes, apte à être utilisé sans risque pour l'environnement. Pour cette raison, toute précaution prise par l'exploitant dans le but de réduire ce risque est à encourager. Afin de faciliter le processus de dégradation, une série

d'étapes prépare le déchet en fonction du système de traitement appliqué par la suite. En fonction du procédé mis en place, ces opérations de préparation peuvent être effectuées ou non.

I.1.1. Tri

Le tri est une opération nécessaire pour séparer, dans un déchet extrêmement hétérogène, les matières organiques fermentescibles, des fractions non valorisables par le biais du compostage. Cette phase vise la séparation des catégories principales de matières recyclables : le verre, les plastiques, les métaux, le carton ou le papier ; elle peut aussi permettre le tri de différentes sous-catégories (verres blancs ou verts, différents plastiques) pour une valorisation. Différentes sortes de tri sont envisageables [Zurbrugg, 1996] :

- Tri à la source : c'est la solution la plus favorable car les déchets sont séparés dans le foyer et ne sont donc pas mélangés et souillés avec d'autres produits. Ce tri réduit et facilite le travail des trieurs sur l'usine de compostage. Dans les P.E.D, ce tri à la source n'est pas encore une démarche de gestion des déchets, compte tenu des difficultés de collecte et diverses expériences de collecte sélective se sont avérées inopérantes.
- Tri par collecte sélective : cette technique permet de récupérer les produits dangereux (peintures, piles...) et de réduire la toxicité dans les déchets à composter.
- Tri après collecte : il est réalisé sur le site de traitement des déchets. De nombreuses méthodes de séparation des déchets hétérogènes sont envisageables, du tri manuel au tri mécanisé, en fonction du procédé en aval. Selon le type de recyclage envisagé, les déchets peuvent être séparés en produits combustibles ou en matières recyclables suivant l'optique de vente. Les caractéristiques les plus fréquentes de séparation sont : la taille, la densité, le magnétisme, mais aussi la nature même du déchet.

I.1.2. Broyage

La fonction principale du broyage est d'offrir aux micro-organismes un champ d'action aussi large que possible et de réduire le volume des matières de base. Un volume restreint facilite la manipulation des andains et améliore la structure de ce dernier. Cette phase facilite donc la biodégradation des déchets par les micro-organismes et diminue la durée du traitement. Elle correspond à une première attaque « physique » du substrat réduisant ainsi la résistance naturelle à la dégradation.

La phase de broyage peut également servir d'**homogénéisation** permettant de répartir équitablement les différents composants des déchets afin d'uniformiser toutes les substances nécessaires à la biodégradation dans toute la masse. Le broyage est à recommander uniquement pour les déchets verts. En présence d'éléments toxiques (piles ou médicaments) dans le cas des déchets urbains, le broyage en amont est à proscrire, car il fractionne ces éléments comme toutes les impuretés nuisant à la qualité du compost final. Il sera alors très difficile d'éliminer ces éléments toxiques pendant le traitement.

I.2. Fermentation

Le procédé de fermentation est le cœur du système de l'installation et se divise en deux étapes : l'étape de biodégradation et celle de pré-humification. Les procédés de fermentation « accélérés » interviennent sur cette première étape pour améliorer les performances de la biodégradation et réduire sa durée. L'essentiel est de maintenir l'humidité (40-60%), l'apport d'oxygène et de contrôler la montée en température. Les procédés de fermentation seront développés dans le paragraphe suivant.

I.3. Maturation

La stabilisation du compost se fait au cours de la phase de maturation, formation de complexes organo-humiques, stabilisation de la matière organique, transformation des éléments. Souvent la maturation se réalise en andains statiques indépendamment du type de fermentation et dure en moyenne deux ou trois mois. Durant cette phase les andains doivent être suivis pour contrôler la stabilisation du compost et éventuellement apporter des mesures correctives (retournements, arrosages).

I.4. Mise en forme du produit pour la commercialisation

I.4.1. Criblage

Le criblage est l'étape convertissant le compost mature en un produit commercial exempt d'impuretés. L'utilisateur de compost recherche un produit sain sans impuretés. Bien qu'il n'existe pas de prescription particulière, le marché guidant la finesse du criblage révèle une demande pour un produit fin. La granulométrie est déterminée selon le degré de maturité du compost ainsi que sa destination : compost frais : 0-40/50 mm, compost mûr ou végétal : 0-15/20 mm, substrat : 0-10 mm. L'intérêt secondaire du criblage réside dans l'évacuation d'une grande partie des substances étrangères (pierres, résidus métalliques, matières plastiques, etc.) constituant le refus d'affinage.

L'utilisation ultérieure du refus est déterminée en fonction de la qualité des impuretés présentes. Si le refus comprend une partie importante de substances étrangères, il sera évacué dans un centre d'enfouissement technique (C.E.T). Sinon, ce refus dégradé où prolifèrent des micro-organismes, est remis en tête du processus pour assurer « l'inoculation » du matériau de base.

Cette étape intervient à différents stades selon le procédé : avant ou après la maturation. Ce choix dépend de la composition des déchets et influe sur la qualité du produit. Les cribles utilisés sont variés selon le degré de sophistication de l'usine. Des systèmes rudimentaires ou à petite échelle préféreront un crible manuel, nécessitant essentiellement de la main d'œuvre. Les systèmes industriels opteront

pour un affinage mécanique en trommel ou en table vibrante. La capacité, donc les dimensions du crible, sont fonction du flux de déchets entrants et du rendement souhaité.

I.4.2. Conditionnement et stockage

Le compost stocké avant commercialisation doit être entreposé dans un hangar à l'abri des intempéries pour conserver toutes ses caractéristiques (humidité, granulométrie et teneur en éléments nutritifs). En fonction de la demande, il est ensuite conditionné en sacs facilitant le transport

Ces quatre étapes se retrouvent dans tous les procédés de compostage. Les différences apparaissent sur le positionnement des étapes de criblage par rapport à la chaîne de traitement et également dans le système de fermentation choisi. Les performances de ce dernier sont contrôlées par l'apport en eau, en oxygène, la descente de maille et également l'augmentation de la densité.

II. Techniques de fermentation

Les techniques de compostage varient selon le type et la quantité de déchets à traiter. Elles sont rustiques dans les systèmes traditionnels utilisés par le secteur informel, modernes et souvent mécanisées à l'échelle industrielle. Le rôle de la technologie dans le compostage est clairement défini : les différents moyens techniques servent à améliorer et à accélérer le processus biologique naturel. Pour ce faire, on cherche à optimiser l'activité des micro-organismes en régulant les paramètres principaux (température, humidité et aération) et en améliorant la qualité du substrat à composter. Il existe donc différentes techniques de compostage. Le choix du procédé et de la technologie est fonction de la situation locale : nature, quantité et disponibilité des déchets, ainsi que du coût de production incluant main d'oeuvre, énergie et eau. Les principaux systèmes de compostage actuellement sur le marché peuvent être séparés en quatre types [Aboulam, 2005] :

- Type 1 : fermentation en **andains** à l'air libre ou sous hangar, avec aération mécanique ou forcée,
- Type 2 : fermentation accélérée en cellules **horizontales** closes,
- Type 3 : fermentation accélérée en cellules **verticales** closes,
- Type 4 : fermentation accélérée en **tube rotatif**.

Le Tableau 19 comptabilise la fréquence d'utilisation de certains procédés tirés d'environ 150 ouvrages.

Tableau 19 : Fréquence d'apparition à travers la littérature des techniques de compostage dans les P.E.D

Type	Procédé	Fréquence d'utilisation en %
1	Andains	49,9
1	Andains couverts	13,1
2	Casiers	13,1
2 ou 3	Enceinte close	10,8
Autres	Lombri-compostage	6,5
4	Tube rotatif	6,4

La méthode la plus répandue dans les P.E.D est le compostage en andains à 60%, couverts ou non. Les autres méthodes correspondent à des systèmes plus sophistiqués. Ces pourcentages correspondent à une recherche effectuée dans la littérature et ne sont donc pas le reflet de la réalité des quantités traitées. Par contre, cette étude révèle les tendances en matière de filière de compostage : un compostage moins sophistiqué est le plus fréquent, dans les P.E.D, qu'il soit informel ou industriel.

II.1. Fermentation en andain

Les déchets sont placés en andains, rangés et retournés périodiquement. Cette fermentation de type Bühler, Luchaire, Gondard, Sual, selon les constructeurs, est naturelle et améliorée par des techniques permettant la pérennité du processus de dégradation. La forme de l'andain arrondie, triangulaire ou trapézoïdale est décisive pour l'efficacité du traitement biologique, et fonction du système de compostage choisi.

L'**andain en couches** correspond à une superposition de couches de déchets. En raison des divers véhicules de livraison, tracteur et broyeur qui passent sur le tas, le matériau est trop compressé. Ce système s'est révélé non rentable, donc abandonné par la majorité des exploitants.

L'**andain triangulaire** présente une hauteur allant jusqu'à 2 m et une largeur de 2,5 à 3 m. Une « couche extérieure » d'épaisseur 0,3 m soit environ 40% du volume total, limite l'activité biologique dans cette zone, limitant la montée en température. Cependant, la nature des déchets dans les P.E.D exige un taux d'oxygénation élevé, favorisé par cette technique. L'échange gazeux entre la partie centrale de l'andain et l'extérieur, est supérieur à celui rencontré dans les andains trapézoïdaux.

La hauteur des **andains trapézoïdaux** est fonction du matériau de base et des conditions atmosphériques. Il est possible de constituer des andains d'une hauteur de 3 m pour 7 à 8 m de base et une pente de 70%. Dans ces conditions, le besoin en surface par mètre cube de matériaux est réduit d'un quart par rapport à la demande de la technique en andains triangulaires [Grossmann, 2003].

L'apport d'oxygène est un des paramètres nécessaire au bon fonctionnement du compostage. Il se réalise naturellement par une ventilation résultant de la flottabilité des gaz chauds dans l'andain et en majeure partie par les échanges gazeux lors des retournements successifs. Les équipements utilisés pour le retournement varient avec la taille de l'usine : les petites plates-formes de capacité 5 000 à 7 000 T/an aèrent à l'aide d'un chargeur à godet, les usines de plus grande capacité avec des équipements mobiles permettant une aération efficace grâce à des retourneurs. Ces retournements favorisent l'homogénéisation des déchets, indispensable en raison de la descente de maille granulométrique pendant la fermentation.

L'aération forcée est une autre technique de ventilation, qui consiste en une mise en andain classique avec un système d'aération par buses disposées au sol insufflant ou aspirant de l'air et alimenté par des compresseurs. Il requiert un investissement élevé comprenant du génie civil et le système de compresseur lié à une consommation d'énergie élevée. Ce système est donc peu adapté aux P.E.D.

La méthode de compostage en andain est fréquemment mise en œuvre dans les pays industrialisés, Espagne, France, Royaume Uni, Italie, Allemagne...[Bellenoue, 1998 ; A.N.R.E.D, 1985] et les P.E.D : Inde, Sri Lanka, Mexique, Népal, Argentine, Indonésie, Ghana, Burkina Faso, Bénin, Chine, Sénégal, Cameroun, Pakistan...[Ngnikam, 2000 ; Wahyono & Sahwan, 2000 ; Van Beukering *et al.*, 1999 ; Gonzalez del Carpio, 1998 ; Tuladhar & Bania, 1998 ; Asomani-Boateng *et al.*, 1996 ; Zurbrugg & Ahmed, 1999]. Cette technique est simple de contrôle, à faible coût d'investissement, nécessite une main d'œuvre importante, dont disposent les P.E.D.

II.2. Fermentation accélérée en réacteur horizontal

Suivant leur nature, les déchets subissent un prétraitement physique de broyage ou dilacération, avant d'être déposés dans un couloir de fermentation ou silo de 30 m de large, de longueur adaptée au procédé et sous un hangar. Le passage d'une roue pelleteuse à axe horizontal placée sur des murets de séparation, brevet Siloda®, permet un retournement automatique des déchets tous les deux jours. Cette roue permet le déchiquetage des déchets et leur déversement sur une double vis sans fin. Cette dernière envoie le produit dans le silo voisin permettant simultanément son oxygénation et son homogénéisation. Un système de ventilation, similaire à celui de l'aération forcée, peut-être ajouté. Un contrôle permanent des paramètres de fonctionnement humidité, oxygénation, température est assuré et les émissions gazeuses sont captées puis traitées par des unités de désodorisation [www.vincienvironnement.fr].

II.3. Fermentation accélérée en réacteur vertical

L'exemple de la tour Triga® ou selon le constructeur Carel-Fouché, Peabody, Hazemag comprend un cylindre vertical en béton armé constitué généralement de quatre compartiments appelés « hygiénisateurs ». Le temps de séjour est en moyenne de quatre à douze jours en fonction de la hauteur de la tour. Parfois une ou plusieurs tours peuvent être placées en série afin d'améliorer les performances. Un extracteur à vis enlève et agite le matériel en haut du réacteur. Le volume et le nombre des « hygiénisateurs » sont adaptés aux flux de déchets entrants. Les ordures ménagères sont admises successivement dans chaque compartiment. La sortie des déchets s'effectue à l'aide d'une vis d'extraction pivotant à la base du silo [Bajon *et al*, 1994]. L'aération est effectuée à l'aide de « dépresseurs » situés en haut de la tour et permettant le maintien d'une température moyenne de 70 à 80°C. Un contrôle continu de l'humidité, de la température et de l'oxygénation du milieu est informatisé, donc un meilleur contrôle de la dégradation biologique est réalisé.

Plus de 25 usines de ce type ont été construites en Europe depuis 1962, et notamment en France où le procédé est adapté pour du co-compostage avec des boues. Dans les P.E.D, ce procédé est peu utilisé. Pourtant au Brésil, 2 usines sont implantées :

- A Brasilia : 660 T/j, temps de séjour dans la tour de 6 jours puis fermentation en andain de 30 à 60 jours. Cette usine a été fermée après 2 ans de fonctionnement à cause de dégagements d'odeurs nauséabondes.
- A Rio de Janeiro (usine de Caju), 1 100 T/j, temps de séjour de 4 jours pour chacune des 3 tours placées en série de dimensions 16 m de haut, 14 m de diamètre, suivi d'une maturation extérieure de 30 à 45 jours [Haug, 1993]. Cette usine a été fermée en 1994.

II.4. Fermentation accélérée en tube rotatif

II.4.1. Exemple du procédé « Biologic Reactor Stabilisation » (BRS®)

L'étape de fermentation thermophile aérobie est réalisée dans un tube rigoureusement horizontal. Ce système est constitué d'un cylindre en tôle d'acier de forte épaisseur qui tourne sur lui-même. Sur la paroi interne, des fers profilés à intervalles réguliers facilitent la circulation verticale des déchets dans le but d'augmenter leur hauteur de chute, de mieux les aérer et les homogénéiser. La partie aval du tube est constituée d'un crible en tôle. La longueur du cylindre conditionne la durée de séjour des déchets en général de 3 jours pour une longueur de 24 m. La vitesse de rotation varie entre 0,5 et 1 tr/min [www.vincienvironnement.fr]. Parfois, ce temps de séjour est réduit à un jour quand l'usine est saturée. A Bangkok (Thaïlande) trois systèmes de tubes rotatifs sont placés successivement, correspondant à une durée de 8 à 12 heures de fermentation accélérée [Sogreah consultants, 2001]. La qualité du compost est fortement pénalisée par la quantité élevée de matières fermentescibles non

dégradées, et par la forte présence de matières plastiques et de verres. Ce procédé est souvent rencontré en France et en Europe [Furedy, 2000], mais rarement dans les P.E.D.

II.4.2. Exemple du procédé Dano®

Ce procédé fut développé au Danemark dans les années trente par Dano® Ltd. [Haug, 1993]. Il est constitué d'une enceinte cylindrique, de diamètre compris entre 2 et 4 m, de longueur variable suivant la capacité de l'usine, entre 20 et 45 m. Ce procédé traite des déchets urbains seuls mais aussi associés à des boues de station d'épuration [Anonyme, 1984, Stahlschmidt, 1984]. Le réacteur, rempli à moitié de déchets, tourne à une vitesse comprise entre 0,1 et 1 tr/min. Les déchets se déplacent de manière hélicoïdale vers la sortie simultanément avec la rotation du réacteur. Tout au long de leur cheminement, les déchets sont homogénéisés et subissent, par abrasion, une réduction de la granulométrie. Le cylindre se termine par une section de criblage. Le temps de séjour dans le réacteur dépend du rythme d'alimentation, entre 1 et 5 jours. Cette étape est suivie d'un criblage puis d'une maturation. Le contrôle des principaux paramètres comme l'humidité, l'apport de nutriments ou l'aération, est informatisé.

Ce procédé est l'un des plus populaires dans la gestion des déchets urbains : il en existe une centaine en Europe. Dans les P.E.D, il est également souvent rencontré : trois usines pilotes en Egypte [Stahlschmidt 1984], 4 usines au Brésil [Fardeau, 2000], en Chine [Wei, 2000] et en Turquie [Erdin, 1999]. Malgré sa notoriété ce procédé rencontre des problèmes notamment au niveau du dégagement d'odeurs nauséabondes.

Ces quatre types de technologie sont les plus fréquemment rencontrés dans les P.E.D. Mais de multiples variantes existent, aussi nombreuses que de brevets et de constructeurs.

II.5. Autres types de fermentation

D'autres techniques, moins fréquemment utilisées, peuvent être mises en œuvre dans les P.E.D, mais elles ne correspondent pas aux critères définis dans cette étude qui concerne les procédés industriels.

- le **compostage en casier** : la dégradation s'effectue totalement, ou partiellement, dans des casiers, de volume compris entre 4 et 20 m³. Le produit est changé de casier toutes les semaines pendant 8 semaines. L'aération passive est amenée par des tuyaux [Wahyono & Shahwam, 2000].
- le **lombricompostage** : dégradation de la matière organique par les vers de terre qui la consomment et la transforment [Bertolino & Lardinois, 1998; Perla, 1997 ; Waas *et al.*, 1996].
- le **co-compostage** : mélange de déchets d'origines et de structures différentes (boues de station d'épuration avec des déchets verts par exemple) [Hyung Hong *et al.*, 1984].

III. Bilan dans les P.E.D

III.1. Conditions et problèmes spécifiques aux P.E.D

La conception des usines de compostage installées dans les P.E.D doit tenir compte des conditions spécifiques locales. Les **conditions climatiques**, notamment un climat humide, influencent les conditions de dégradation. La teneur en eau lors du procédé doit être contrôlée et optimale. Afin d'éviter un apport d'eau trop abondant et involontaire par pluviométrie, il est préconisé de couvrir les plates-formes de fermentation, ou quelques fois uniquement les andains. Ce problème d'humidité intervient également au niveau de la **composition** même des ordures ménagères, leur humidité moyenne étant supérieure à 50%. La montée en température lors du processus de dégradation débutera après un temps de latence, correspondant à l'évacuation de cet excès d'humidité. La montée en température est effective après un ou deux jours de ruissellement des « lixiviats ». Ces rejets liquides doivent être traités pour éviter leur propagation dans le milieu naturel.

Les fortes teneurs en **sables**, spécifiques aux P.E.D altèrent les équipements par abrasion. Cette teneur dépend bien souvent des conditions climatiques et de l'état des voies de circulation. Comme cités précédemment, les déchets ont une forte teneur en eau, ne permettant pas de séparer les sables par voie mécanique. De plus, après fermentation, les matières organiques ont la même granulométrie que les sables, et il est très difficile de les trier.

III.2. Bilan des procédés dans les P.E.D

Les quatre grands procédés de fermentation présentés ci-dessus se retrouvent fréquemment dans les usines de compostage installées dans les P.E.D. Ces usines présentent souvent des technologies exportées des P.I, sans aucune adaptation aux conditions spécifiques du pays et de la ville. Le Tableau 21 récapitule ces procédés fréquemment employés dans les P.E.D et leurs raisons d'arrêt ou de dysfonctionnements. Les causes de ses dysfonctionnements sont diverses, difficultés de commercialisation du compost, qui restreignent l'usine à fonctionner en régime intermittent, problèmes de renouvellement des équipements lors de pannes, le personnel n'ayant pas les moyens techniques ou les compétences.

La mise en **andains** est le procédé de compostage le plus répandu dans les P.E.D. Les systèmes de **réacteurs horizontaux** ou **verticaux** sont peu cités dans la littérature. Les problèmes de dégagements d'odeurs nauséabondes sont à la source de la fermeture rapide des usines un ou deux ans après leur ouverture. Par contre, les systèmes de **tubes rotatifs** sont répandus dans les P.E.D. Leurs dysfonctionnements sont liés à des difficultés de commercialisation du compost, à la mauvaise qualité

de compost due à un non respect du temps de séjour nécessaire pour la dégradation des M.O mais également à l'usure prématurée des équipements liés à des difficultés de réparation.

Les causes des dysfonctionnements ou des arrêts d'usines ne sont pas spécifiques aux procédés de fermentation employés, ni aux pays concernés. En effet, certaines causes comme des problèmes politiques ou des difficultés de commercialisation sont redevables au contexte socio-économique de l'endroit d'implantation de l'usine ce qui est précisé dans une étude de Zurbrugg (2003 b). Il est évidemment nécessaire de les minimiser notamment en réalisant une étude de marché concernant les débouchés du compost [Grossman, 2004].

Les avantages et les inconvénients de chaque procédé sont récapitulés dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Récapitulatif des procédés de fermentation employés dans les P.E.D

	<i>Andain</i>	<i>Réacteur vertical</i>	<i>Réacteur horizontal</i>	<i>Tube rotatif</i>
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - En extérieur ou intérieur - Composts de nature diverse - Facilité d'exploitation - Faible coût d'investissement 	<ul style="list-style-type: none"> - Espace réduit - Confinement des odeurs - Contrôle des paramètres 	<ul style="list-style-type: none"> - Espace réduit - Confinement des odeurs - Contrôle des paramètres 	<ul style="list-style-type: none"> - Aucun prétraitement (sauf verres & plastiques) - Forte diminution des nuisances - Espace réduit - Contrôle des paramètres
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Manutention importante - Qualité irrégulière 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation forte d'énergie - Investissement lourd - odeurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation forte d'énergie - Investissement lourd - Respect du temps de séjour 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation forte d'énergie - Investissement lourd - Respect des temps de séjour

En considérant les informations tirées de la bibliographie et celles de l'analyse des procédés de compostage dans les P.E.D, il apparaît que les réacteurs verticaux ou horizontaux sont peu employés et présentent deux inconvénients majeurs : un investissement élevé et une utilisation d'équipements sophistiquées posant des problèmes de maintenance. Les deux procédés fréquemment rencontrés sont la mise en andains et le tube rotatif. La première solution doit être différenciée de la mise en andain traditionnelle à petite échelle, action réalisée par les O.N.G ou les associations de quartiers. A une échelle industrielle, l'apport d'air se fait par retournement mécanisé ou par aération forcée. La main d'œuvre nécessaire est abondante pour conduire ces différents équipements. Le procédé en andain est généralement plus long que la fermentation accélérée en tube rotatif, qui conditionne mieux le déchet pour le traitement via un meilleur déchetage et une homogénéisation complète des déchets.

La chaîne de traitement par compostage est très complexe, du fait du grand nombre d'étapes et de la multitude des méthodes de fermentation. Cette diversité permet certes l'adaptation de cette filière à tous les déchets biodégradables, mais elle demeure une difficulté dans le choix de la chaîne de production de compost la mieux adaptée aux conditions locales dans les villes des P.E.D. L'analyse du fonctionnement de ces usines montre que les dysfonctionnements qui apparaissent ont plusieurs origines : technologique, économique, financière et politique.

Tableau 21 : Exemples de dysfonctionnements rencontrés dans les P.E.D

Type	Procédé	Pays et usine	Source	Date de mise en service	Capacité (T/j)	Problèmes rencontrés
1	Andain	Maroc Marrakech	Benami, 1987 Hafid, 2002 a Begnaud <i>et al</i> , 1990	-1967 -modification du crible (1976) - remise en état (1980-81)	140	Fermeture : 1989 Difficultés de commercialisation Fonctionnement intermittent et en deçà de la capacité nominale
	Andain	Meknès		1980	230	Difficultés de commercialisation Fonctionnement intermittent et en deçà de la capacité nominale
	Andain	Rabat-Salé		-1961 -extension en 1971	50 puis 200 T/j après extension	Difficultés de commercialisation Renouvellement des équipements
1	Andain	Turquie Izmir	Erdir, 1999	1988	500	Renouvellement des équipements Formation des employés
1	Andain	Tunisie Tunis		1991	20	Fermeture : 1998 Raisons politiques
2	Réacteur horizontal	Maroc Casablanca	Benami, 1987 ; Begnaud <i>et al</i> ; 1990 ; Hafid <i>et al.</i> , 2002 b	1974	700	Fermeture : 1975: Production d'odeurs nauséabondes
3	Réacteur vertical	Brésil Brasilia	Guaraldo, 1987 ; Pereira-Neto, 2001		660	
3	Réacteur vertical	Rio de Janeiro (Caju)	Fardeau, 2000		1 100	Fermeture : 2 ans après Production d'odeurs nauséabondes
4	Réacteur rotatif	Sao Matheus Vila Leopoldina		1970 1974	210 puis 900 T/j 420 puis 600 T/j	
4	Tube rotatif	Indonésie Sourabaya			100 T/j	Fermeture : 1983 Difficultés de commercialisation: concurrence avec les engrais chimiques et avec le criblé de décharge
4	Tube rotatif	Turquie Izmir (2 usines)	Erdir, 1999	1968 & 1969	75 puis 150 T/j	Usure des équipements Raisons politiques
4	Tube rotatif	Thaïlande Bangkok	Sogreah, 2001			Qualité de compost : temps de séjour trop court

Chapitre 4 : Analyse de la filière compostage des P.E.D

Ce chapitre réalise la synthèse des informations regroupées dans les trois chapitres précédents en mettant en exergue la problématique de la gestion des déchets dans les P.E.D. Les dysfonctionnements de la filière compostage résultent d'une mauvaise appréciation des conditions minimales de réussite de cette filière sur le plan technologique, commercial, politique et financier.

I. Aspect « technologique » du procédé

Les dysfonctionnements proviennent essentiellement de l'inadaptation des technologies de compostage à la nature des déchets. En effet, bien souvent, les ordures ménagères sont collectées et transportées brutes sur le site. Il est alors nécessaire d'effectuer un tri afin d'éliminer les produits toxiques comme les piles ou les inertes qui accélèrent la détérioration des équipements et pénalisent la qualité du compost [Van Beukering *et al.*, 1999 ; Tuladhar & Bania, 1998]. Si les déchets sont très humides et riches en fines des modifications des équipements doivent être envisagées, par exemple pour les déchets verts, l'utilisation d'un broyeur équipé de marteaux spécifiques adaptés à la quantité élevée de fines [Benami, 1987], ou un cribleur positionné plus en amont de la collecte. Les problèmes d'équipements incomplets ou inadaptés apparaissent au fur et à mesure du fonctionnement de l'usine et entraînent des défaillances dans le procédé. En Turquie, l'usine d'Izmir était dimensionnée pour une capacité nominale de 500 T/j et ne fonctionne qu'à sa moitié quelques années plus tard, à cause d'une usure précoce des équipements [Erdin, 1999]. De même, une durée trop courte de mise en fermentation est préjudiciable, elle engendre une mauvaise dégradation de la matière organique et par conséquent une qualité médiocre de compost, il reste alors des particules de cartons et papiers dans le produit final non stabilisé [Shin *et al.*, 1997]. Ces problèmes doivent être anticipés lors de l'étude préliminaire à l'implantation de l'usine.

La capacité de l'usine est fonction de l'évolution, de la production des déchets ménagers et de l'évolution démographique. Trop souvent dans les P.E.D, des usines ont été surdimensionnées et fonctionnent en dessous de leur capacité nominale ou par intermittence [Pereira-Neto, 2001]. A *contrario*, certaines usines ont été sous-dimensionnées et ne peuvent pas être agrandies par manque de place [Gamage *et al.*, 1999]. L'étape essentielle de caractérisation des déchets engendrés dans la ville (flux et composition) ne doit pas être négligée. Ces problèmes se posent aussi lorsque le marché du compost a été mal évalué et la capacité de stockage sous dimensionnée.

Des usines ayant une technologie mécanisée et sophistiquée, rencontrent des problèmes de maintenance trop complexes [Asomani-Boateng *et al.*, 1996] ou des coûts de réparation trop élevés. La disponibilité des pièces de rechange étant difficile sur place, les exploitants font appel aux opérateurs étrangers. Les délais de réparation sont alors longs, ce qui contraint l'usine à fonctionner avec une chaîne non complète ou à arrêter la production. Les réparations les plus rapides sont évidemment celles de proximité. On peut encore citer l'exemple d'un procédé en réacteur horizontal à Casablanca en 1976, n'ayant fonctionné que quelques mois à cause d'un dégagement d'odeurs nauséabondes dues à l'inadaptation du procédé aux caractéristiques des déchets urbains, trop humides, sans doute dégradées en anaérobiose [Benami, 1987].

Aux problèmes liés à la construction du site et au choix de la technique de compostage s'ajoutent ceux provenant d'une irrégularité du suivi et du contrôle du processus de dégradation. Des contrôles réguliers sont nécessaires pour surveiller le bon déroulement du traitement et ajuster les paramètres [Mbuligwe *et al.*, 2002]. Par exemple, si l'aération n'est pas régulière et suffisante, le système tend à passer en fermentation anaérobie. Les conditions ne sont alors plus optimales, la durée du traitement augmente et un dégagement d'odeurs nauséabondes apparaît [Tuladhar & Bania, 1998]. A ceci s'ajoute une prolifération d'animaux indésirables comme les mouches ou les rats [Perla, 1997] qui peuvent ensuite transmettre des germes pathogènes. Le produit obtenu, non hygiénique, comporte des risques pour les cultures et par évolution de la chaîne tropique pour l'Homme. Le suivi de l'humidité lors de la fermentation est essentiel [Gnanih *et al.*, 1998, 1997]. Si l'humidité est insuffisante, la fermentation ralentit par inhibition des micro-organismes responsables du processus, à l'inverse, une humidité trop forte empêche les échanges gazeux, induisant une fermentation anaérobie. Ce paramètre est d'autant plus important que dans la plupart des P.E.D, il existe deux saisons : sèche et humide. Il est donc nécessaire d'ajuster l'humidité en fonction de la saison sans pour autant créer trop de lixiviats. En effet, beaucoup d'usines à petite échelle ne possèdent pas de système de récupération des lixiviats. Ces derniers sont rejetés directement dans le milieu naturel sans aucun traitement [Tuladhar & Bania, 1998]. Pour réduire la quantité de lixiviats produits, une toiture peut-être nécessaire afin de limiter l'impact des intempéries et de réduire le lessivage du compost. Certaines usines sont construites sur une dalle bétonnée, avec récupération de lixiviats, limitant également les apports de sable ou de gravier au cours du traitement.

Des contrôles réguliers et fréquents assurent une bonne qualité au compost final. La vente du compost dépend de sa qualité et des spécificités demandées par les utilisateurs. L'exploitant doit être capable de certifier la qualité de son produit dans le temps, quelles que soient les saisons et les variations des flux de déchets entrants. Souvent, le compost produit dans les P.E.D est de qualité médiocre : apport insuffisant en matière organique et nutriments [Wei *et al.*, 2000], présence de métaux lourds, de particules de plastiques et de verre ou de sable en quantités non négligeables [Hoorweg & Thomas, 1999].

Ces contrôles sont trop rarement réalisés ou bien peu évoqués dans la littérature. De plus, l'aspect extérieur du compost est important : selon sa destination finale, notamment dans le secteur du maraîchage ou du jardinage, les éclats de verre et les morceaux de métal anguleux sont généralement refusés par les utilisateurs pour des raisons de sécurité.

Ces contrôles ainsi qu'une réglementation sévère au niveau de la production et de l'utilisation du compost assure un produit de qualité dans les pays industrialisés. La réglementation est quasi inexistante dans la majorité des P.E.D ou non appliquée lorsqu'elle existe [Gamage *et al.*, 1999 ; Bertolino & Lardinois, 1998]. Il en est de même pour les contrôles de qualité sur le produit fini.

Si l'utilisateur en l'occurrence l'agriculteur ou le jardinier n'est pas assuré d'apporter un minimum d'éléments nutritifs à son sol, il se tournera vers d'autres fertilisants ou amendements que le compost, diminuant les possibilités de ce marché et mettant en difficulté l'usine ainsi que toute la filière.

II. Aspect commercialisation du compost

Le compost est, comme tout produit commercial, soumis au marché de l'offre et de la demande mais surtout à celui de la concurrence. En effet, il entre en compétition avec les fertilisants chimiques, plus faciles d'utilisation et dont l'image n'est pas négative comme celle du compost issus de déchets [Wahyono & Sahwan, 2000 ; Perla, 1997]. En plus de cette compétition avec les fertilisants chimiques, les usines de compostage sont souvent mal adaptées au marché local [Yoon-Seok, 1999]. Pour être compétitive, l'usine doit produire un compost de qualité dans des proportions adaptées au marché [Zurbrugg, 2003 b]. Pour cela des études doivent être réalisées avant l'implantation de l'usine, mais elles sont rarement effectuées ou non réalistes lorsqu'elles existent. Ces études permettent de connaître les débouchés : soit le marché traditionnel (Volume Markets) destiné aux cultures, maraîchage ou la sylviculture, la quantité de production de compost prime alors sur sa qualité, soit le marché de rente (Dollars Markets) destiné aux pépiniéristes, aux paysagistes, qui recherchent davantage un produit de qualité [Zurbbrugg *et al.*, 2003 c, Bionet, 2002].

Des essais d'apport de compost sur une parcelle agricole sont parfois réalisés dans les conditions expérimentales rigoureuses par des agronomes. Ces essais d'amendement ont aussi l'avantage de montrer à l'utilisateur le potentiel et l'intérêt de cet amendement en terme de rendement de production à l'hectare. Ils doivent jouer un rôle fondamental pour la communication sur le compost, compte tenu de l'habitude d'utilisation des fertilisants chimiques [Matejka *et al.*, 2001, Rivero *et al.*, 2004]. Les débouchés du compost correspondent aux problèmes majeurs des P.E.D. Parfois le marché est inexistant à cause d'une forte tradition de compostage individuel en milieu rural [Wei *et al.*, 2000] ou non exploitable dans son intégralité [Tuladhar & Bania, 1998]. Les études préliminaires sont essentielles tout comme une bonne politique commerciale pour vendre et promouvoir le compost [Hoorweg & Thomas , 1999]. Pourtant les sols des P.E.D ont besoin d'éléments nutritifs pouvant être apportés par le compost sous forme minérale. Il possède un effet à long terme dans le sol comparable aux fertilisants chimiques. Le compost possède d'autres propriétés comme la diminution de l'érosion, l'augmentation de la capacité de rétention en eau ou l'amélioration des échanges gazeux [Zurbrugg, 1999 a].

Les avantages du compost d'ordures ménagères sont reconnus et sont incitatifs pour différents secteurs économiques, grandes cultures, maraîchage, sylviculture, pépinière, horticulture, mais aussi celui des particuliers et celui réservé à des usages particuliers (culture en serre, agriculture biologiques). Pour faciliter son utilisation et son transport, il est préférable de le vendre en sac plutôt

qu'en vrac [Yoon-Seok, 1999]. Des essais ont été réalisés afin de conditionner le compost sous forme de granulats, facilitant ainsi nettement son utilisation [John *et al.*, 1996].

De meilleures conditions de commercialisation passent par une amélioration de l'aspect physique du compost et qualité de produits dont la composition est parfaitement définie et contrôlée. Il est donc important de s'assurer de l'existence d'un marché pour la consommation du compost. La mévente de ce produit risque de créer une accumulation, puis une saturation de l'usine, pouvant engendrer un dérèglement du fonctionnement, puis la fermeture progressive de l'usine ou sa transformation en « décharge incontrôlée » ou « sauvage » comme à Blida (Algérie) [Grosman, 2002]. Vis-à-vis de la population, l'effet est alors contraire à l'image recherchée à savoir l'utilisation des déchets valorisés par le compostage.

III. Aspect politique

La réussite de la rentabilité des usines de compostage dans les P.E.D est fortement connectée à l'implication des autorités locales dans le projet. La mise en œuvre d'une gestion globale des déchets rigoureuse et cohérente avec une politique de recyclage de matériaux triés et de valorisation de la M.O, implique nécessairement l'installation durable de l'usine de compostage. Les déchets sont triés et les différentes catégories de recyclables sont séparées comme le verre, le plastique, les métaux... [Furedy, 2000 ; Gonzalez del Carpio, 1998]. La politique de gestion globale des déchets est souvent associée à une volonté de réduction de la production à la source [Shin *et al.*, 1997]. Dans les P.E.D, une mauvaise gestion des déchets peut être à l'origine d'un dysfonctionnement au niveau de la collecte par conséquence des difficultés au niveau du compostage.

C'est pourquoi, il est essentiel que les autorités locales mettent en place une politique de communication et de sensibilisation auprès de la population comme des utilisateurs de compost, afin de promouvoir et de garantir ce produit. Elles doivent notamment faire preuve d'une attention particulière à la production du compost d'ordures ménagères, qui diminue le gisement à traiter dans les décharges et doivent également faire ressortir les avantages de ce produit par rapport aux fertilisants chimiques. Pour ce faire, les responsables locaux peuvent lancer de grandes campagnes de promotion auprès des écoles [Yoon-Seok, 1999], des associations de quartiers [Shin *et al.*, 1997] et notamment celles des femmes qui sont souvent plus sensibilisées aux problèmes d'environnement et aux risques sanitaires que les hommes.

Si l'investissement des autorités est important pour promouvoir le compost, il s'avère aussi néfaste lorsque des conflits d'intérêt ont lieu au niveau des politiques locales, nationales ou au sein des exploitants [Arinola & Arinola, 1995]. Ceci aboutit à des lenteurs décisionnelles, qui risquent de geler les financements et de compromettre les campagnes de communication.

IV. Aspect financier et économique

Le coût de production du compost inclut aussi, en plus des coûts de procédé, les frais engendrés par l'étude de faisabilité, l'investissement initial sur les équipements et sur les bâtiments, le coût d'achat, de transport des matières premières et du compost, les matières entrantes (eau, énergie), les frais administratifs...

Le coût de l'implantation d'une usine de compostage est moins élevé que celui d'une usine d'incinération ou d'un centre d'enfouissement technique. Lors de la collecte, il est difficile d'utiliser des véhicules spécialisés coûteux et rarement disponibles sur le marché local. Les faibles moyens financiers de la population imposent un coût de collecte peu élevé avec des ramassages moins fréquents et des moyens légers [Tuladhar & Bania, 1998]. Ceci se traduit sur le site par des arrivages irréguliers provoquant une amorce de la fermentation des déchets avant leur traitement. Une étude comparative sur le mode de gestion des déchets urbains dans 9 capitales de la Zone de Solidarité Prioritaire (ZSP) [Folléa *et al.*, 2001] montre que la collecte payante en P.A.P est la plus répandue et la moins chère. Le coût de transport du compost n'est pas négligeable, bien que certaines usines l'effectuent gratuitement [Nunan, 2000] dans le but d'améliorer leur compétitivité en réduisant les dépenses de production.

Le prix de vente du compost et celui des matériaux recyclables triés sur le site doivent rééquilibrer le bilan financier de l'usine. Cependant peu de données sont disponibles sur celui du compost industriel, seules quelques études ciblées sur du compostage décentralisé l'évoquent [Zurbrugg *et al.*, 2004]. En effet, ce prix de vente spécifique aux conditions de chaque usine, est fonction du coût de production du compost et de celui des autres fertilisants. Certaines subventions et aides financières des pouvoirs publics ou des O.N.G laissent une marge plus importante pour ces différentes dépenses. Il apparaît que certains sites ne sont pas rentables [Dulac, 2001] car les revenus de la vente du compost et des matériaux recyclés ne couvrent pas le coût de production, de conditionnement et de transport. De plus, un marché limité et une compétition avec les fertilisants chimiques obligent certains exploitants à réduire leur prix de vente même si sa qualité reste correcte.

La rentabilité de l'usine dépend également de son niveau de sophistication, demandant une maintenance pointue et une certaine expérience des opérateurs. Il est alors plus difficile de rentabiliser une usine sophistiquée, bien que le coût de production soit plus faible et que la quantité produite plus élevée. Des exemples de dysfonctionnements d'usines de compostage dus à des financements insuffisants peuvent être cités notamment en Chine dans les années 80 [Wei *et al.*, 2000].

V. Complément sur l'analyse bibliographique

Ce bilan bibliographique a été réalisé à partir de documents trouvés dans des journaux scientifiques au sein de centres de ressources dans des rapports d'organismes internationaux, et de conseils fournis par les professionnels du compostage. Environ 300 publications concernant le compostage ou la gestion des déchets urbains dans les P.I comme dans les P.E.D ont été analysées. Elles concernent 49 pays localisés sur quatre continents : Europe, Asie, Afrique, Amérique latine et Amérique du nord récapitulés Tableau 22.

Tableau 22 : Analyse de la revue bibliographique

	<i>Europe</i>	<i>Asie</i>	<i>Afrique</i>	<i>Amérique latine</i>	<i>Amérique du nord</i>
<i>Nombre de pays</i>	6	10	16	6	2
<i>% publication</i>	31,6	30,6	25,5	8,2	4,1

Le nombre de références pour l'Europe est sensiblement proche de celui pour l'Asie et l'Afrique ceci s'expliquant par la facilité d'obtention des documents, bien que le sujet soit ciblé sur les P.E.D. L'Amérique latine est très peu représentée dans cette recherche alors que le continent africain regroupe la plus forte diversité de pays mais ne concerne que 25% de la documentation.

Concernant la nature même des documents, une forte majorité 78% est tirée de publications scientifiques, les autres sources provenant essentiellement de centres de ressources divers comme S.A.N.D.E.C, W.A.S.T.E, l'Agence française du Développement, la banque mondiale, le P.N.U.D, ou le P.N.E.D mais également d'échanges avec les professionnels du compostage. Les références trouvées sont récentes, puisque 63,1% datent de moins de 5 ans et 11,5% sont entre 5 et 10 ans. Au delà de 10 ans, la part de publications s'élève à 25,4% sachant que la référence la plus ancienne datent de 1959.

Au cours de cette recherche, nous avons pu vérifier que la majorité des documents consultés restent très généralistes et ne décrivent que trop rarement les problèmes de compostage rencontrés dans les P.E.D avec leurs dysfonctionnements, sans en analyser en détails les causes de réussite ou d'échec.

Conclusion de l'analyse bibliographique

Si la gestion des déchets urbains demeure problématique dans tous les pays, dans les P.E.D, elle n'est pour l'instant qu'un concept théorique, les communes et leurs responsables ne réagissant qu'au jour le jour. L'élimination de ces déchets par compostage conduisant à un amendement organique - le compost - susceptible d'être valorisable directement en agriculture peut apparaître comme un moyen essentiel et important pour l'élimination des déchets. Cependant un tel mode de traitement nécessite une bonne connaissance des paramètres de suivi et de contrôle du procédé. L'ajustement de ces paramètres permet d'obtenir une dégradation optimale et ainsi de produire un compost de qualité non toxique pour les sols et par voie de conséquence pour toute la chaîne alimentaire.

La littérature sur le compostage est très riche d'informations scientifiques sur le processus de compostage mais elle est beaucoup plus restreinte sur les procédés. Les différentes études décrivent les paramètres physico-chimiques et microbiologiques nécessaires à l'élaboration du compost, ses caractéristiques ou son comportement après incorporation au sol. Cependant, les informations sont moins répandues pour l'approche technique des différents procédés.

La plupart de ces travaux scientifiques se contentent d'étudier un ou plusieurs paramètres au cours du compostage et de les valider par des essais en laboratoire et parfois sur site [Francou, 2003], mais ils ne précisent pas de manière détaillée les données et les conditions concernant les déchets bruts ou les paramètres du procédé. En effet, très peu de rapports d'étude détaillent les conditions de réalisation du procédé sous le couvert du secret industriel. Dans quelques rares cas, on peut lire des bilans des usines, des équipements et des débouchés du compost [Grossmann, 2003 ; Grossmann 2002 ; Sogreah, 2001]. Le contenu de ces études reste très généraliste et aucune n'intègre tous ces paramètres **ensemble** sur un **même flux de référence à chaque étape du procédé** comme le recommande l'étude d'Aboulam (2005) qui a déterminé l'influence des différents équipements sur les bilans massiques de plusieurs usines. Du fait de la multitude de procédés de compostage existants, de l'importance de leurs variantes, et du peu de données fournies par les exploitants (bien souvent du domaine privé), la comparaison de ces résultats reste donc difficile. Tous ces travaux montrent néanmoins l'absence de données précises et complètes sur le bilan de fonctionnement de ces usines et le manque de méthodologie simple et rapide, pour évaluer l'efficacité des procédés. Ce constat est valable pour tous les pays, mais à cause d'une part du besoin de désengorgement des sites d'enfouissement et de la fermeture des décharges sauvages, et d'autre part de la forte demande en amendement organique et en fertilisant pour les sols pauvres très sollicités par l'agriculture, il devient indispensable de combler ce vide et d'apporter des solutions pérennes.

Partie II : Méthodes et moyens d'analyse

Chapitre 1 : Mise en place des outils d'évaluation et descriptions des sites d'étude

La réalisation de l'analyse bibliographique a permis d'effectuer une base de données, facilitant l'accès à l'information et à son exploitation. Des dysfonctionnements dans les procédés de compostage sont apparus à l'issue de cette analyse permettant de sélectionner des indicateurs performants pour les évaluer. Ces derniers devront être validés sur des sites afin de considérer les conditions spécifiques de chacun.

*La méthodologie d'expertise est un outil de vérification du fonctionnement de la filière compostage. Elle engendre des mesures correctives pour perfectionner celle-ci et améliorer la qualité et la quantité du produit : le compost. C'est donc un outil de **progrès** pour l'usine.*

Ce chapitre présente l'axe logique de réflexion, qui a fait naître les indicateurs de performance et mène également à la description des sites d'application de cette méthodologie.

L'élaboration de cette méthodologie d'expertise s'est déroulée en quatre phases :

- phase 1 : la recherche bibliographique a permis de faire un état de l'art du compostage dans les P.E.D et d'élaborer une base de données afin de faciliter l'accès aux informations.
- phase 2 : la rédaction de questionnaires pour les exploitants et les maîtres d'ouvrages est nécessaire pour mieux saisir le contexte de la gestion des déchets et du procédé de compostage.
- phase 3 : l'élaboration du protocole d'expertise et sa validation sur des sites expérimentaux ont identifié les dysfonctionnements de l'usine.
- phase 4 : le bilan et le cahier de recommandations ont permis de restituer les données recueillies lors de l'étude et d'en analyser les indicateurs de performance et de fonctionnement.

I. Réalisation d'une base de données

Une base de données a été élaborée à la suite de la recherche bibliographique, pour synthétiser toutes les informations collectées. Tous ces ouvrages ont été classés selon des critères « classiques » liés à la nature même des références et des critères « ciblés » sur les axes de la recherche.

Parmi les critères classiques, ceux des références bibliographiques sont retrouvés, à savoir le ou les noms d'auteurs, l'année de publication, le titre de l'article, la référence de l'ouvrage, les pages concernées. Puis des paramètres plus généraux, comme le pays de l'étude ou la nature de la source : publication scientifique, organismes internationaux, rapport industriel, centre de ressources ont été rajoutés. La base de données propose d'autres informations sur le compost, les procédés techniques, les coûts liés à la filière, la valorisation agronomique puis les aspects politiques et de gestion des déchets dans les pays ou dans les villes.

Ces documents se sont vus attribuer une note en fonction des objectifs de l'étude qui dans un premier temps ont été ciblés sur le procédé de compostage et non sur la filière. Cette notation s'échelonne de 0 à 5. La note 0 est affectée pour une publication, où le sujet n'est pas en harmonie avec la problématique. Plus le contenu de la publication est intéressant, plus la note attribuée augmente. Ainsi, la note 5 est attribuée à une référence, qui fournit des informations importantes et dont le sujet est en adéquation avec la problématique de recherche.

Cette base de données, réalisée sous Excel, facilite d'une part le classement et le tri des informations et d'autre part la synthèse des documents et leurs analyses.

II. Elaboration de la méthodologie

La filière compostage comprend trois étapes essentielles, la collecte des déchets, le procédé technologique et la valorisation du compost. Certains indicateurs évaluent des profils et des tendances pour une meilleure compréhension des causes de dysfonctionnement [Tyteca, 2002]. Les tentatives

visant à définir un indicateur unique, pouvant être largement appliqué, n'ont pas encore abouti. Un indicateur est en général caractérisé par deux éléments fondamentaux :

- une mesure (paramètres) ou une fonction de plusieurs mesures
- une définition des objectifs c'est-à-dire l'évaluation des orientations actuelles et futures, l'estimation des modifications et des conditions spécifiques, et la détermination des impacts [Shah, 2000].

La méthodologie élaborée doit permettre une représentation, la plus fidèle possible, du fonctionnement réel de l'usine. Des indicateurs, rapides, faciles et simples d'obtention ont été identifiés à la suite de l'analyse bibliographique pour estimer l'activité de l'usine. Ces derniers, universels, permettent de comparer des usines ayant des procédés, des flux différents et dans des conditions locales variées.

II.1. Questionnaires complémentaires

Des questionnaires de deux types ont été élaborés :

- le premier permet de mieux appréhender la situation de la gestion des déchets dans le pays et au niveau local. Il est adressé au ministère de l'environnement et de l'agriculture et aux autorités locales.
- le deuxième, adressé aux exploitants des usines, permet de connaître le procédé de compostage et de pouvoir cibler les dysfonctionnements et les manques aux niveaux des informations fournis par l'exploitant.

II.2. Indicateurs de fonctionnement

Les principales causes de dysfonctionnement ressortant de la littérature sont :

- l'inadaptation de la capacité de traitement,
- l'inadaptation technique du procédé,
- la maintenance des équipements,
- l'odeur,
- la quantité, la qualité et l'aspect visuel du compost.
- la commercialisation du compost.

II.2.1. Choix des indicateurs

La réalisation du **bilan pondéral** de l'usine, permet, tout d'abord, de confirmer la capacité nominale de traitement de l'usine, ensuite sa productivité en compost. Il est réalisé sur la totalité de la masse des déchets traités au jour de référence J, et tout au long du procédé de compostage, afin de connaître la production et les refus à chaque étape. Une étude de Belevi (2000), analyse le flux massique global de la filière des déchets de la ville de Kumasi (Ghana) en considérant les procédés de traitement comme des « boîtes noires » dans ce système complexe de gestion des déchets. Les résultats

obtenus permettent d'identifier les risques pour l'environnement et donc de donner des clés de réponse pour les décideurs.

Le pourcentage de **matières triées** (%MT) est un point spécifique du bilan pondéral. Il permet de juger de l'efficacité du tri par rapport à la composition des déchets urbains, et par conséquent de sa pertinence.

La **caractérisation** des déchets est essentielle lors de l'évaluation du fonctionnement d'une usine de compostage. Cet indicateur se divise en deux critères : la caractérisation par catégorie de composants des déchets, ou catégorisation, et la granulométrie. La catégorisation des déchets urbains détermine les possibilités de revalorisation des ordures ménagères pour les matières recyclables et les matières organiques fermentescibles. Elle permet d'évaluer l'adéquation de la filière de traitement avec les déchets. Le suivi de l'évolution des catégories identifie les points de dysfonctionnements des équipements, par exemple, un tri mal réalisé ou une perte en matière organique à une étape du procédé. L'évaluation de la granulométrie des déchets à chaque étape, renseigne sur le bon déroulement du processus. Le compostage est basé sur une dégradation de la matière organique, s'accompagnant d'une réduction, mécanique ou naturelle, de la taille des particules. La granulométrie est un des paramètres essentiels du compostage.

Les **caractérisations** peuvent être réalisées soit sur déchets humides, soit sur déchets secs. L'analyse sur déchets humides reflète le mieux la réalité du procédé. L'humidité et la densité des déchets jouent un rôle dans le fonctionnement des équipements, comme le trommel. Par contre, travailler avec des déchets humides est plus difficile pour la phase de séparation granulométrique. Les fines particules, chargées en humidité, s'agglomèrent aux autres catégories. Il est également difficile, dans les granulométries les plus faibles, de différencier, par exemple, du papier en dégradation avec de la matière fermentescible. La caractérisation sur déchets **secs** permet donc une reconnaissance plus facile des différents constituants. Les erreurs liées au tri sont alors restreintes. Par contre, cela implique de sécher de forte quantité de déchets, ce qui peut poser des problèmes dans les conditions locales des P.E.D.

La récupération optimale de la **matière organique** des déchets et sa transformation en compost sont les premiers objectifs du procédé de compostage. Par conséquent, le suivi de la teneur en matière organique est primordial pour l'évaluation du rendement de l'installation.

La **densité** évolue en fonction de l'avancement du traitement des déchets. Elle est inversement proportionnelle à la granulométrie, se réduisant lors du procédé. Elle est estimée à chaque étape du procédé pour déterminer la variation et le volume occupé par les déchets.

Le **suivi de l'eau** intervient tout au long de la chaîne de traitement. Une humidité trop élevée des déchets rend difficile la séparation des matériaux recyclables lors du tri, ou risque de colmater les

mailles du crible lors de l'affinage. A contrario, une teneur en eau trop faible est préjudiciable pour les conditions optimales de dégradation. Ce paramètre relié à d'autres renseigne sur plusieurs indicateurs en fonction de l'étape où il est analysé.

Le suivi des modifications de **maturité** s'effectue au cours de la dégradation des déchets en andain. Il n'existe pas de paramètre unique de référence permettant de juger de l'état de maturité du compost, mais une multitude qu'il est nécessaire de comparer entre eux. Sont utilisés, les paramètres globaux comme la température, l'humidité ou le pH, le rapport C/N, la perte au feu, les tests respirométriques, les tests colorimétriques de type Solvita® et les tests d'auto-échauffements. Le suivi de ces indicateurs permet le contrôle du processus de dégradation de la matière organique, et le réajustement des paramètres liés à la qualité.

Cette **qualité** du compost est évaluée par les teneurs en éléments nutritifs, celles en éléments toxiques et inertes mais également par l'aspect microbiologique. La teneur en métaux lourds, ainsi que le pourcentage d'inertes et d'impuretés juge l'aptitude du procédé à séparer ces éléments. L'évaluation de l'aspect sanitaire du compost renseigne sur l'efficacité de la montée en température. Des paramètres spécifiques à la législation du pays doivent faire l'objet d'un suivi afin de s'assurer de la conformité du compost avec la réglementation en vigueur.

D'autres **indicateurs**, intitulés indicateurs de performance, sont mis en avant pour juger de l'efficacité de l'usine, la stabilité et de la rentabilité financière de l'usine. Le prix de vente du compost informe simultanément sur le coût de production, sur les possibilités et la compétitivité du compost face aux fertilisants concurrents, engrais chimiques ou fumiers. Le coût de production renseigne sur les investissements financiers de l'entreprise, qui a en charge le traitement des déchets.

II.2.2. Hiérarchisation des indicateurs

Les cinq points de dysfonctionnements recensés dans la littérature sont évaluables par plusieurs indicateurs. L'influence et l'importance de chacun de ces indicateurs sont déterminées subjectivement par rapport à la pertinence des informations qu'ils fournissent sur un dysfonctionnement. A partir de l'analyse des résultats bibliographiques, une hiérarchisation peut alors être réalisée (Cf. Tableau 23).

Tableau 23 : Influence des paramètres

<i>Indicateurs</i>	<i>Commercialisation</i>	<i>Qualité</i>	<i>Maintenance</i>	<i>Capacité</i>	<i>Odeurs</i>
<i>Flux</i>	++	++	+++	+++	+
<i>% matières triées</i>	+	++	+++	+++	+
<i>Granulométrie</i>	+++	+++	+	+	+
<i>Caractérisation</i>	+++	+++	+	+	+
<i>Densité</i>	+++	+++	++	+	+
<i>Suivi de l'eau</i>	+	+++	++	+	++
<i>Matière organique</i>	+++	+++	+	+	++
<i>Maturité</i>	+++	+++	+	+	+++
<i>Qualité du compost</i>	+++	+++	+	+	++
<i>Conformité</i>	+++	+++	+	+	+
<i>Prix de vente</i>	+++	+	+	++	+
<i>Coût de production</i>	+	+	+++	+++	+
Importance de l'influence :		+ Faible	+++ Forte		

Les dysfonctionnements mis en avant par l'analyse bibliographique sont évalués par ces indicateurs, mais certains n'apparaissent pas, notamment le rendement, la production de compost et celle de refus. Ces manques sont toutefois pris en compte par la suite dans la méthodologie. Dans un souci d'élaborer une méthodologie adaptable à chaque usine, ils seront tous analysés afin de déterminer les plus pertinents malgré parfois leur redondance.

II.3. Choix des sites industriels de compostage dans les P.E.D

Les sites expérimentaux retenus sont ceux rencontrés dans la littérature, ou par le biais de l'expérience des professionnels du compostage. Des critères, hiérarchisés dans la Figure 4, ont aidé à ce choix.

II.3.1. Classification

Les pays concernés par cette étude sont des P.E.D ou des pays émergents ayant un Produit Intérieur Brut (P.I.B) par habitant inférieur à 3 255 \$/an. Dans la suite de l'étude, le terme P.E.D sera employé pour caractériser ces deux catégories P.E.D et pays émergents. Les chiffres relatifs aux P.I.B sont tirés d'une même source limitant ainsi les erreurs de calculs provenant de plusieurs origines. La banque mondiale [www.devdata.worldbank.org] classe les pays en 4 catégories selon la méthode « Atlas » en fonction de la valeur de leur P.I.B (chiffres de 2004) :

- < 825 \$: P.E.D « low income »,
- compris entre 826 et 3 255 \$: pays émergents « lower middle income »,
- compris entre 3 255 et 10 065 \$: pays en voie d'industrialisation « upper middle income »,
- > 10 666 \$: pays industrialisés.

Cette classification est également utilisée comme référence dans certaines publications [Zurbrugg, 2002] mais les valeurs des P.I.B doivent être réactualisées chaque année. L'étude porte uniquement sur les usines de compostage de déchets urbains en fonctionnement, afin de valider la méthodologie dans des conditions normales de fonctionnement, mais dans un premier temps, une plate-forme de déchets verts est étudiée pour valider la démarche globale de la méthodologie.

II.3.2. Critères de sélection

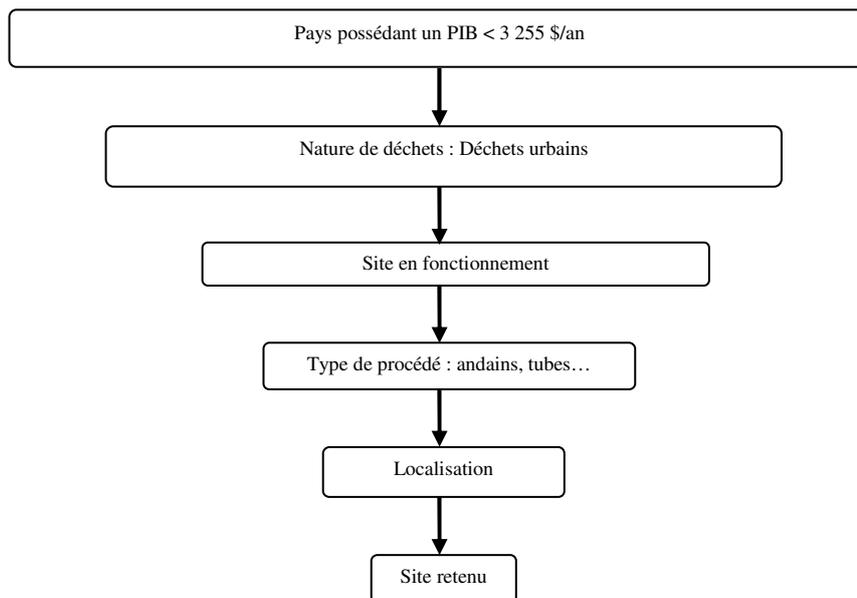


Figure 4 : Critères de sélection des sites

Différentes usines de compostage ont été retenues à ce stade. Le choix s'effectue selon leurs techniques de fermentation en andains ou en tubes rotatif : un panel de procédés sera analysé. Enfin, le dernier critère est la localisation de l'usine. Pour une étude non exhaustive, il est indispensable d'observer les caractéristiques des usines sous différents climats. Le choix des usines s'étend donc à tous les continents. Certaines données d'usines, trouvées dans la littérature, semblent intéressantes de par leurs caractéristiques recoupant les critères de sélection : Agadir (Maroc), Alexandrie (Egypte) ou Calcutta (Inde). Ce sont des sites réellement industriels mais des informations plus complètes pour obtenir les détails du procédé sont nécessaires avant de sélectionner le site le mieux adapté pour la validation de la méthodologie. En effet, l'objectif de l'étude est l'élaboration de la méthodologie d'expertise et non les résultats du fonctionnement même de l'usine expertisée. Ce choix a également été influencé par la facilité de mise en œuvre d'enquêtes et d'essais sur le terrain, par la présence de partenaires de recherche (O.N.G, chercheurs, étudiants...). Les sites retenus grâce à ces critères sont :

- une usine industrielle de déchets verts en France, pour valider dans un premier temps la logique globale de la méthodologie, puis pour réajuster les outils élaborés afin de faciliter sa réalisation,
- une filière mécanisée et industrielle de compostage de déchets urbains en Afrique du Nord, afin de tester puis valider les indicateurs de performance mises en avant pour l'évaluation du procédé de compostage,
- une filière de compostage informelle de déchets ménagers en Afrique de l'Ouest, afin d'élargir la méthodologie à la filière complète de compostage en prenant en compte l'amont : la collecte et l'aval : la valorisation du compost.

III. Description des sites d'étude

Pour des raisons de confidentialité, les sites seront uniquement désignés de la manière suivante : site A, site B et site C respectivement pour le site en France, pour celui d'Afrique du Nord et pour le dernier situé en Afrique de l'Ouest.

III.1. Site industriel A de déchets verts en France

Le site A correspond à une plateforme de compostage de déchets verts. Elle traite 7 900 T/an de déchets verts en provenance des particuliers, des services municipaux et des pépiniéristes. Cette plateforme se trouve sous un climat tempéré à dominance continentale. Les déchets verts du mois sont broyés, et arrosés pour obtenir une teneur en humidité proche de 65%, puis mis en andains. Les dimensions moyennes d'un andain trapézoïdal en début de fermentation sont 35 m de longueur, 13 m de largeur à la base et 7 m au sommet et d'une hauteur de 4 m. Le volume moyen d'un andain est de 1500 m³, pour une masse de 750 tonnes pesées par différence entre l'entrée et la sortie des camions. La distance séparant deux andains est voisine de 50-70 cm.

L'humidité est au besoin réajustée au cours de la dégradation. Le procédé de fermentation se poursuit durant 4 mois avec un retournement mécanique à la « chargeuse » tous les mois. Le produit fermenté, est alors criblé à une granulométrie de 20 mm (ou 10 mm selon la demande). Le refus de criblage est réinjecté en tête du procédé au niveau de l'étape de broyage. Le compost mûr est fourni au particulier en échange de leurs déchets verts ou vendu aux professionnels. Le procédé de l'usine est représenté sur la Figure 5.

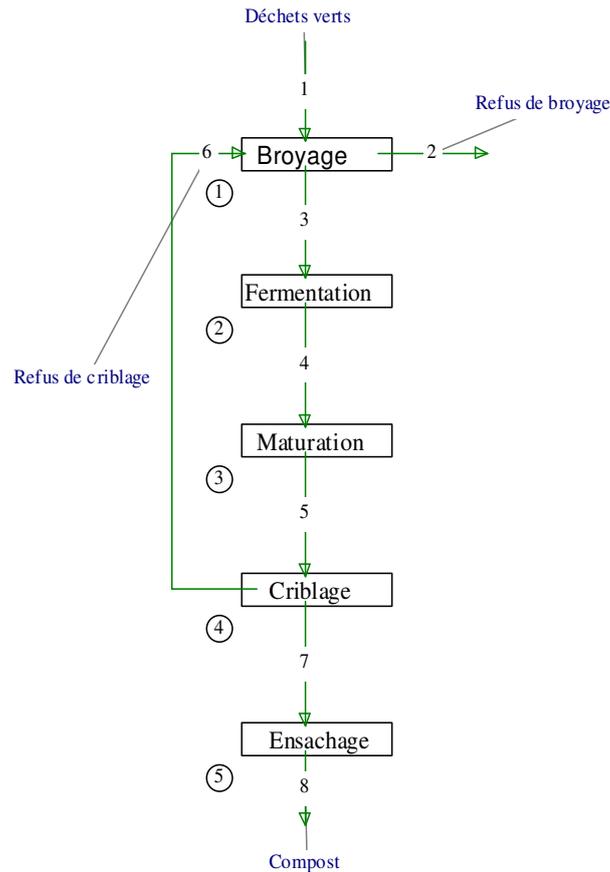


Figure 5 : Schéma de fonctionnement de l'usine A

III.2. Site industriel B en Afrique du Nord

III.2.1. Gestion des déchets urbains

Le site B correspond à une agglomération de plusieurs millions d'habitants. Bien que le climat du pays soit à dominance désertique, la proximité de la mer, lui confère un climat sous influence méditerranéenne. Pendant cette période, un vent engendre des tempêtes de poussière et de sable brûlant, ce dernier venant modifier la composition des déchets.

La collecte des déchets urbains est établie depuis longtemps dans cette ville. Récemment, leur gestion a été confiée à une entreprise, qui a en charge la collecte, le transport et le traitement des déchets de la ville. La collecte est réalisée en P.A.P, chaque jour, par des camions spécifiques jusqu'à des stations de transit. En fonction de l'origine des quartiers desservis, les déchets sont ensuite envoyés en usine de compostage ou en C.E.T. Une collecte spécifique pour les D.A.S est en prévision avec un traitement par autoclave puis un stockage en C.E.T.

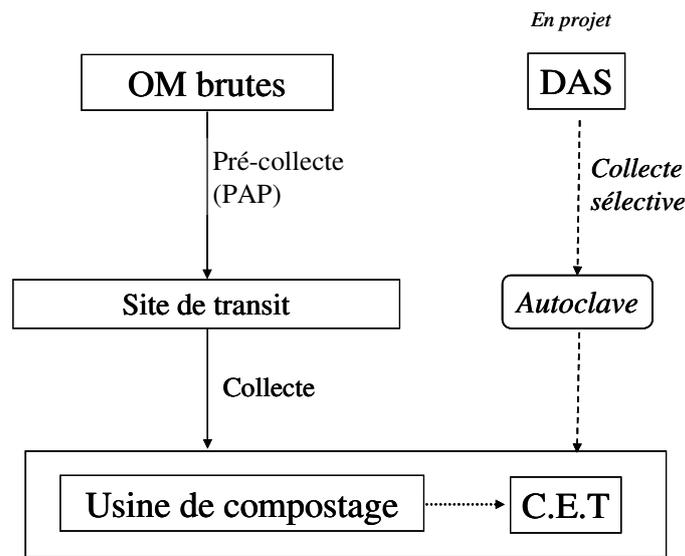


Figure 6 : Schéma de gestion des déchets de la ville B

III.2.2. Description de l'usine B

Les équipements de l'usine sont :

- Quai de réception,
- Tapis de tri avec déferrailage magnétique (dimension (L*I) : 1*34 m, vitesse : 28 m/min),
- Tube rotatif de type Dano ® (dimension (L*I) : 3*11,5 m, vitesse : 10 tr/min),
- Trommel de maille ronde 55 mm (dimension (L*I) : 3*2,5 m, vitesse : 10 tr/min),
- Table vibrante de maille ronde 14 mm.

Les matières recyclables (verres, plastiques, carton) sont séparées. A la suite du passage des déchets dans le tube rotatif dont le crible est de maille 55 mm, les déchets sont mis en andains par un convoyeur. Une poulie magnétique permet l'élimination des éléments ferreux dans le refus de crible. Les dimensions (longueur, largeur à la base, hauteur) moyennes d'un andain, en début de fermentation sont respectivement 410*3*1,5 m. La fermentation se déroule durant 21 jours. Les retournements mécaniques ont lieu tous les cinq jours, en même temps que l'arrosage, pour maintenir une humidité à 50%. Le compost ainsi obtenu est appelé compost « coarse » (maille < 55mm), et bien souvent vendu en l'état. Sur demande, l'usine fabrique également du compost dit « fine » de granulométrie inférieure à 14 mm. L'usine est dimensionnée pour un débit moyen de 10 T/h de déchets urbains et son fonctionnement est schématisé en Figure 7.

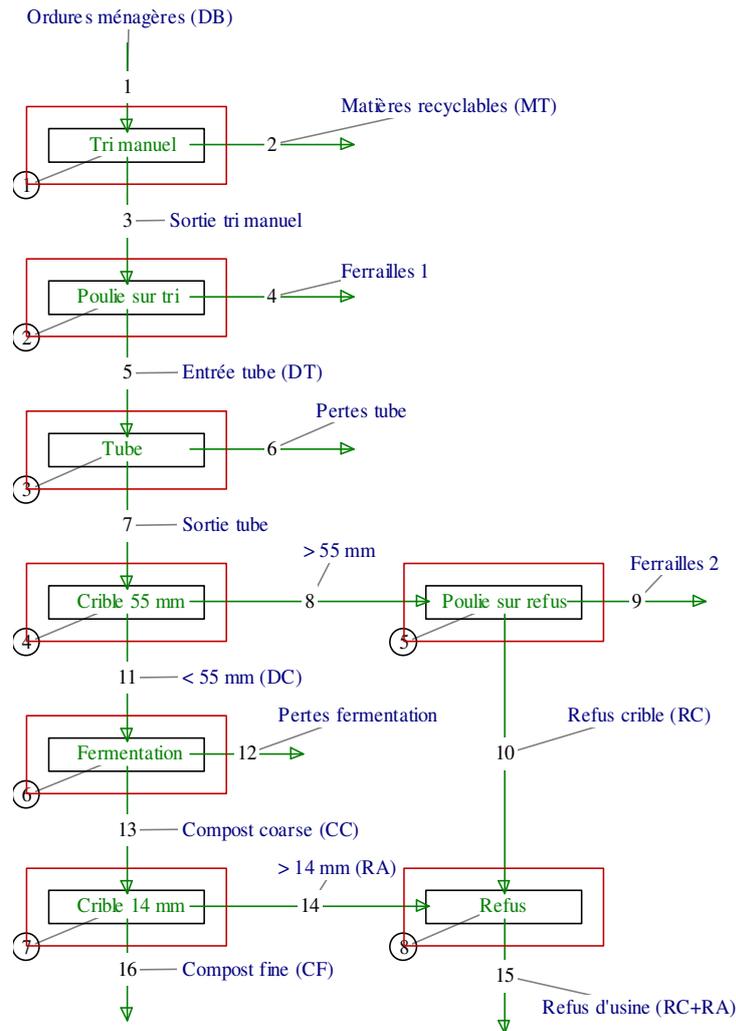


Figure 7 : Schéma de fonctionnement de l'usine B

Légendes :

- DB : Déchets bruts
- DT : Déchets Triés
- DC : Déchets criblés
- DA : Déchets en andain (10 jours)
- CC : Compost Coarse
- CF : Compost Fine
- RC : Refus de crible
- RA : Refus d'affinage
-
- Flux 1 : Ordures ménagères (DB)
- Flux 2 : Matières recyclables (MT)
- Flux 3 : Sortie tri manuel
- Flux 4 : Ferrailles 1
- Flux 5 : Entrée tube (DT)
- Flux 6 : Pertes tube
- Flux 7 : Sortie tube
- Flux 8 : > 55 mm
- Flux 9 : Ferrailles 2
- Flux 10 : Refus crible (RC)
- Flux 11 : < 55 mm (DC)
- Flux 12 : Pertes fermentation
- Flux 13 : Compost coarse (CC)
- Flux 14 : > 14 mm (RA)
- Flux 15 : Refus d'usine (RA+RC)
- Flux 16 : Compost fine (CF)

Les points stratégiques de l'usine correspondent à l'amont et à l'aval de chaque étape, avec une analyse des refus dans certains cas. Toutes les étapes du procédé sont étudiées. Ces points sont nommés en fonction de la nature de l'échantillon : déchets, matériaux, refus, ou compost et de leurs

états au niveau du procédé comme bruts, triés, fermentés,... Pour la suite de l'étude, seules les initiales et les flux indiqués dans la légende précédente seront employés.

Le schéma de fonctionnement de l'usine sépare toutes les étapes y compris celle du passage des déchets dans le tube, comprenant l'homogénéisation dans ce dernier, et le criblage dans le trommel. Cette usine traite entre 200 et 220 T/j de déchets urbains et fabrique 120 T/j de compost.

III.3. Site informel C en Afrique de l'Ouest

III.3.1. Gestion des déchets urbains

Le site C correspond à une agglomération de 80 000 habitants, avec une production de 0,4 kg/hab./jour. Elle se situe au centre d'une région montagneuse, éloignée de 500 Km des côtes de l'océan Atlantique. Une situation hydrique favorable (sources de fleuves) permet le développement de l'agriculture et du commerce. Le climat est tropical avec une alternance de saison de pluies, de mai à novembre, et d'une saison sèche, de décembre à avril. Les sols s'en trouvent très appauvris en éléments fertilisants nécessitant un apport important de matières organiques et autres produits fertilisants favorisant les cultures.

La collecte des déchets urbains a été mise en place en 1995 par une O.N.G. Des désaccords entre la municipalité et l'O.N.G ont eu pour conséquence l'arrêt progressif de la collecte en 2001. Une entreprise a repris la collecte en 2002. Elle est réalisée sur 4 quartiers de la ville (celui du marché inclus). Un collecteur enlève les déchets urbains, les emmène à un point de transit avec une charrette à traction humaine. Le point de regroupement est constitué d'une remorque, transportée par un tracteur jusqu'au site de la décharge, où se situe également la plate-forme de compostage. Cinq bennes sont en fonctionnement pour 1 198 ménages : une pour chacun des quatre secteurs desservis et la dernière vide à la décharge, permettant une alternance rapide. Les remorques ont une contenance de 7m³ environ et sont conduites autant de fois que nécessaire à la décharge, environ une à deux fois par semaine.

Le financement de la collecte s'effectue par le biais de deux sources distinctes de revenus : la carte d'abonnement et la redevance mensuelle. Le prix de la carte d'abonnement est de 1,5€ pour les ménages et 5€ pour les institutions. Une carte est nécessaire par concession (soit environ 7 à 9 personnes) et à une durée de validité illimitée. Le prix de la redevance mensuelle, est fonction de la nature des déchets produits, du niveau social et de l'origine des institutions abonnées. Ainsi, les ménages payent 0,75€, certaines institutions comme les O.N.G payent 5€ tandis que les banques ou les restaurateurs payent 2,5€. Certaines concessions payent mal ou en retard les redevances mensuelles mais cela concerne peu de personnes. Le taux de recouvrement de la redevance reste assez élevé, presque 90%. Aucune sanction n'est encore prise à l'encontre des mauvais payeurs. Les prix de la

carte d'abonnement et de la redevance mensuelle ont été fixés après une étude réalisée en 2001 auprès des usagers, en tenant compte de leur possibilité financière.

Le schéma de la gestion des déchets est représenté sur la Figure 8. Une collecte spécifique est en prévision pour les déchets d'activités de soins et assimilés (D.A.S) avec un traitement par incinération, et pour les boues des latrines avec un procédé de co-compostage. L'O.N.G s'est intéressée à l'optimisation de la gestion des déchets et à la valorisation des matières fermentescibles par la mise en place d'une plate-forme de compostage.

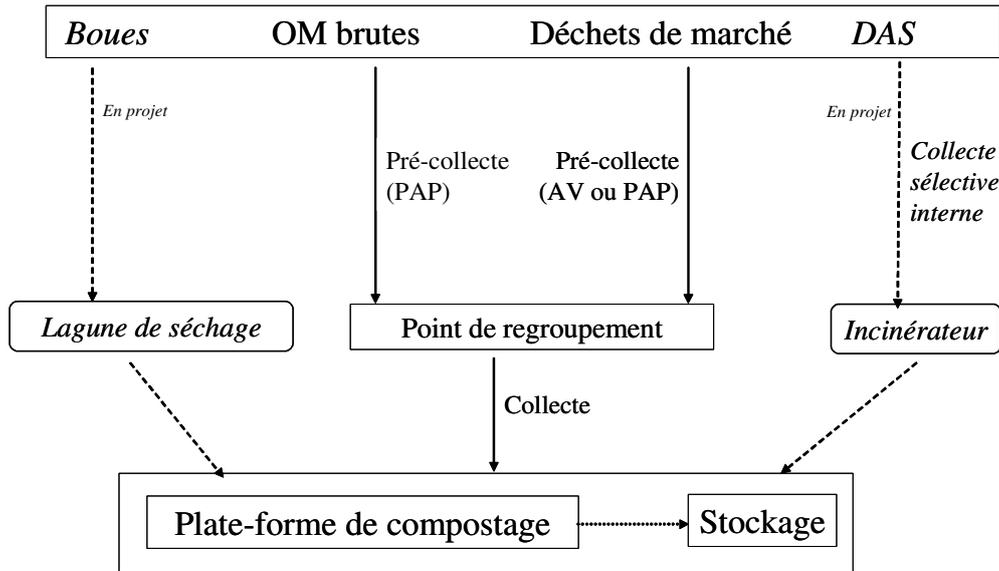


Figure 8 : Schéma de gestion des déchets de la ville C

III.3.2. Description de la plate-forme de compostage expérimentale

La plate-forme de compostage, d'une superficie de 200 m² bétonnée, a été créée en 1999 et dimensionnée pour traiter 5 m³/semaine déchets urbains. Ce système traditionnel est basé sur un tri manuel grossier permettant de recueillir les matières recyclables. Des essais d'optimisation ont été réalisés en 2001 et présentés dans l'étude de Matejka *et al* (2001). La fermentation en andains bâchés dure 45 jours. Les retournements sont réalisés manuellement toutes les 3 semaines avec une teneur en eau maintenue à 50% pendant le procédé. Un criblage grossier entre 10 et 40 mm est effectué sur les déchets fermentés avant la maturation en boxes couverts pendant 12 semaines. Ce type de plate-forme traditionnelle est fréquemment rencontré dans les P.E.D, elle peut être comparée à un pilote en Indonésie de 300 m² produisant 1 300 Kg de compost par mois [Zurbrugg, 1999 b]. Le compost ainsi obtenu est vendu aux agriculteurs et maraîchers. Le coût de revient du compost a été estimé à 1€ pour un sac de 50 Kg, ce qui correspond à un prix compétitif par rapport aux fertilisants chimiques N,P et K (15,3 €), aux bouses (0,3 €) et aux fientes de poulets (1,9 €). Cette plate-forme est à l'arrêt depuis 2002, suite aux différents problèmes rencontrés au niveau du ramassage des déchets ménagers.

IV. Comparaison

Repris dans un rapport de la banque mondiale, les principaux indicateurs socio-économiques des sites de l'étude sont donnés dans le Tableau 24. Ces chiffres reflètent le cadre et le niveau de vie de la population. En comparant ces indicateurs, le niveau de développement de ces sites peuvent être classés par niveau de développement décroissant : du site A au site C. Les écarts entre les conditions d'hygiène de chaque pays, peu d'eau potable disponible et un réseau d'assainissement inexistant, sont importants.

Tableau 24 : Comparaison des indicateurs socio-économiques

<i>Indicateurs</i>	<i>Site A</i>	<i>Site B</i>	<i>Site C</i>
Ressource en eau douce (m ³) (2000)	3 243	1 070	30 478
Espérance de vie (année) (2003)	79	69	46
Accroissement de la population (% annuel) (2003)	0	2	2
Population urbaine (% population total) (2001)	75	42	28
Accès à l'eau potable (% population totale) (2000)	≈ 100	95	55
Accès à l'assainissement (% population totale) (2000)	≈ 100	98	21
P.I.B (par habitant en US \$) (2003)	24 730	1 390	430

Le site A, traitant des déchets verts en France, permet de valider la logique de la méthodologie, avant de l'appliquer sur place. En effet, les contraintes de coût d'étude étant non négligeables, il est essentiel d'arriver sur les sites industriels avec des outils opérationnels et adaptés.

Le site B, un pays émergent, traite de manière industrielle des ordures ménagères par un procédé mécanisé. La méthodologie et les paramètres s'y rattachant sont appliqués sur ce site.

Le site C, un P.E.D, possède une installation traditionnelle, à petite échelle, avec très peu de mécanisation. Les renseignements fournis par ce site, permettent de comparer deux systèmes de collectes très différents et d'analyser l'efficacité de la méthodologie indépendamment de la taille et du niveau de sophistication du site.

Chapitre 2 : Matériels et méthodes analytiques

La méthodologie élaborée se base sur le suivi de paramètres pertinents et rationnels de déchets en phase de traitement. Les déchets entrant dans la chaîne se transforment au cours du procédé, en compost. Les normes applicables à la mesure de ces paramètres sont variées et relatives aux déchets, aux amendements organiques et aux supports de cultures, mais également avec certaines modifications, aux sols et à la qualité de l'eau. Il existe donc pour chaque paramètre, plusieurs méthodes de mesure. Des essais comparatifs ont été réalisés afin de choisir la mieux adaptée en terme de mise en œuvre et de représentativité dans les conditions des P.E.D. Les normes retenues sont présentées dans le chapitre suivant.

I. Echantillonnage

Le prélèvement d'échantillon est crucial, réalisé dans de bonnes conditions, il évite par la suite les erreurs d'interprétation.

I.1. Prélèvement des déchets urbains

Le protocole de prélèvement doit permettre d'avoir un échantillon représentatif de tous les déchets entrants dans l'usine au jour J. Pour cela, des prélèvements de chaque camion arrivant sur l'usine sont effectués tout au long de la journée.

Un godet de pelle mécanique rempli d'environ 1 m³ de déchets est prélevé dans chaque camion, puis les déchets sont déversés sur une aire de tri, propre, abritée de la pluie et du vent. Cette aire est de préférence constituée d'une dalle de béton, limitant la contamination des déchets par le sable. Le reste du camion est déversé dans l'aire de réception. Cette manipulation est renouvelée pour chaque camion. Les éléments fins sont récupérés sur le sol après l'échantillonnage et réintégrés. La totalité de l'échantillon obtenu est pesée, mélangée, puis quartée pour les analyses afin d'obtenir une quantité voisine de 500 Kg.

I.2. Produits et refus avant la fermentation en andain

Un échantillon est prélevé toutes les heures, en sortie de l'étape analysée. La quantité à prélever dépend des étapes. Les déchets en cours de traitement correspondent à un échantillon moyen constitué de 10 prélèvements d'environ 50 Kg récupérés dans la journée de manière aléatoire. L'échantillon est pesé, mélangé avec les prélèvements de toute la journée puis quarté afin d'obtenir la quantité nécessaire pour les analyses. Les déchets sont beaucoup plus homogènes, puisqu'ils ont subi des traitements tels que la séparation des recyclables ou une séparation granulométrique. Les quantités prélevées s'échelonnent entre 100 et 200 Kg afin de réaliser les caractérisations sur déchets secs et sur déchets humides.

I.3. Produits et refus pendant et après la mise en andain

La norme (NF U 44-101) fixe les méthodes d'échantillonnage d'un lot d'amendements organiques ou d'un support de culture. L'objectif est d'obtenir un échantillon le plus représentatif. Globalement, la méthode fait appel à un prélèvement aléatoire de 1 Kg puis à l'utilisation de la méthode de quartage. L'analyse de la littérature, révèle quasiment autant de techniques de prises d'échantillon et de préparation des échantillons que d'études. Les prélèvements effectués dans l'andain correspondent à

un échantillon moyen en 10 points de 10 Kg, ou plus, en fonction de la grandeur de l'andain, à différentes profondeurs (1 m, 1,5 m et 2 m) [W.E.R.L]. Un prélèvement est effectué à la moitié du processus de fermentation (DA) pour suivre l'évolution de la dégradation.

I.4. Conservation des échantillons

Après prélèvement, les déchets sont placés dans des sacs en tissus, puis stockés dans une zone ombragée ou mieux, dans une pièce climatisée à 20°C. La durée de stockage ne doit pas excéder 3 jours sous climat tropical, au-delà, la détérioration de l'échantillon est trop importante.

II. Techniques analytiques

II.1. Analyses physiques

II.1.1. Bilan pondéral

Le bilan pondéral est effectué par pesée différentielle, à l'aide d'un pont bascule. Les refus et matériaux triés sont pesés préférentiellement afin de limiter le déplacement des déchets. Dans le cas de l'usine B, les points de pesée sont représentés sur la Figure 9. Seuls les déchets notés en gras sont pesés, les autres sont calculés par différence. Exemple : $DB - MT = DT$. A cette quantité DT, l'élimination des refus de crible permet d'obtenir la quantité de déchets criblés entrant en fermentation $DT - RC = DC$. La différence de poids entre la totalité de l'andain avant et après la fermentation détermine les pertes liées à la dégradation $CC - DC = \text{Pertes dues à la fermentation}$. Si possible, le compost produit et les refus d'affinage doivent être pesés afin d'identifier et d'obtenir la rentabilité du crible, sinon les quantités de refus seront calculées par différence.

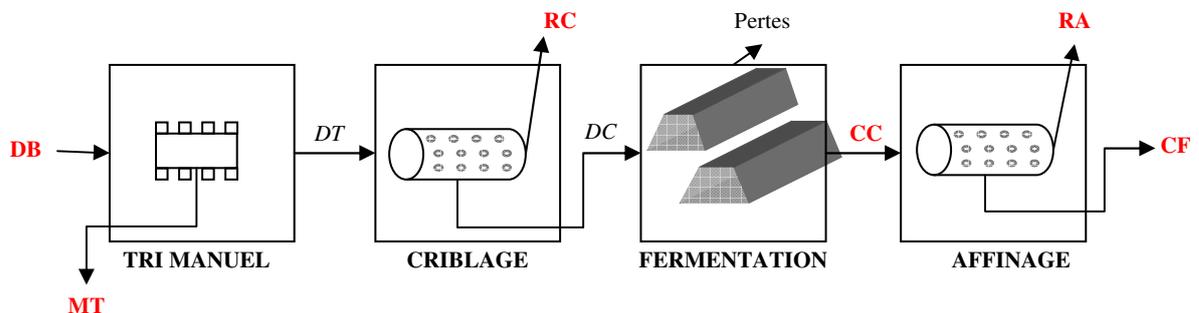


Figure 9 : Points de pesée pour la réalisation du bilan pondéral de l'usine B

La quantité de déchets ménagers arrivant à l'usine est mesurée par différence entre le poids des camions chargés et ceux des camions vides sortant de l'usine. Les autres points sont évalués en sortant les déchets de la chaîne de traitement, en les plaçant dans des bennes qui sont ensuite pesées.

II.1.2. Température

La température est suivie tous les 2 jours, lors du processus de dégradation. La valeur donnée correspond à la moyenne de 6 mesures effectuées dans la longueur de l'andain, de chaque côté, à des profondeurs variables (0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 m). Ces températures sont mesurées par une sonde spécifique dont la longueur est au minimum de 1,5 m.

II.1.3. Densité apparente

La densité est calculée à chaque étape du procédé, sauf pour les matières recyclables, afin de déterminer l'évolution de la dégradation et le volume occupé par les déchets. Un seau de 10 L est pesé vide, puis rempli avec un échantillon. Les pesées sont effectuées avec une balance de précision $\pm 0,250\text{Kg}$. Cette mesure est quadruplée pour chaque camion et pour chaque quantité d'échantillon prélevé avant l'homogénéisation. La valeur de la densité fournie est une moyenne de plus de 50 mesures. La densité d est calculée selon la formule :

$$d = \frac{M}{V} \quad (\text{Kg/L ou T/m}^3)$$

- M : Masse de l'échantillon (Kg)
- V : Volume du seau (L)

Dans un substrat aussi hétérogène que les déchets ménagers, la densité est assimilée à la masse volumique. Dans le cas spécifique des ordures ménagères brutes, cette densité est évaluée après le déchargement des camions sur le quai de réception, et après la prise d'échantillon au godet.

II.1.4. Caractérisation

La méthode de caractérisation la plus répandue en France est le MODECOM©, repris dans la norme NF XP X 30-411 (février 1996) pour l'échantillonnage et la norme NF XP X 30-408 (octobre 1996) pour le tri et la classification. Cette méthode prend en compte douze catégories de constituants : fermentescibles, papiers, cartons, complexes, textiles, textiles sanitaires, plastiques, combustibles non classés, verre, métaux, incombustibles non classés, déchets spéciaux.

Une seconde norme Afnor XP X 30-466 « Déchets ménagers et assimilés – Méthodes de caractérisation, Analyse sur produit sec » est parue en mars 2005. Ces deux méthodes de caractérisation, la première sur déchets humides, et la seconde sur déchets secs, seront employées à chaque étape du procédé de compostage. Certaines modifications ont cependant été apportées :

- le **séchage** des déchets n'a pas pu être effectué à 75°C dans une étuve thermostatée, comme préconisé dans la norme NF U 30-466. Les échantillons ont été étalés sur des bâches, dans une enceinte close, fenêtre ouverte, pour maintenir une bonne aération, avec un chauffage d'appoint. Des retournements fréquents ont été réalisés, pour obtenir un séchage uniforme. Les échantillons sont restés dans cette enceinte jusqu'à obtention d'un produit sec, la durée dépend de l'humidité initiale des déchets, de leur quantité et de la fréquence des retournements. En moyenne, ils ont séché une semaine et leur l'humidité qualifiée de résiduelle a été mesurée dans une étuve à 105°C pour chaque type de déchets.

- la séparation granulométrique est effectuée sur une table de tamisage à grilles amovibles de mailles rondes de dimensions **100, 50 et 20 mm** (au lieu de 100, 20 et 8 mm). Cette table a pour dimension (L*I*h) 1*2*0,2 m. Ces diamètres de mailles, adaptés en fonction du procédé, sont sélectionnés pour obtenir les résultats les plus proches du fonctionnement de l'usine. L'usine B, usine de validation technique, a un procédé avec deux cribles : le premier de mailles rondes de diamètre 55 mm et le second de mailles carrées de côté 14 mm. Le choix des mailles, pour la réalisation de la granulométrie et de la caractérisation, s'est fait en harmonie avec les deux normes et les contraintes locales de l'usine.

- La fraction granulométrique la plus petite est la plus difficile à séparer, du fait de sa consistance terreuse, en principe très humide. Les **fines** sont constituées en majorité d'éléments dégradés, non reconnaissables. Quelques morceaux de verre, de plastiques et de pierres sont visibles, mais leur proportion apparaît moins importante que les composés dégradés. Le tri des fines par catégories de déchets étant fastidieux et incertain, est de ce fait écarté. Dans la suite de l'étude, les fines correspondent à la fraction granulométrique inférieure à 20 mm et non à 8 mm comme le préconise la norme Afnor XP X 30-466.

- Les déchets sont triés selon les principales familles de déchets présentes dans des ordures ménagères [Ademe, 1993]. Une classification simplifiée à **huit constituants** est adoptée :
 1. putrescibles : composés dégradables, résidus alimentaires
 2. papiers – cartons : il est souvent difficile de différencier les papiers des cartons dans un déchets en cours de dégradation
 3. textiles dont le textile sanitaire : pièces de tissu, vêtements et couches principalement
 4. plastiques : sacs plastiques, bouteilles en plastiques, polystyrène
 5. verres : provenant des bouteilles ou de la vaisselle
 6. métaux : boîtes de conserve, capsules de cannettes, ferrailles
 7. inertes : pierres, gravats, coquillages, matériaux de démolition (tuiles, ciment)

8. autres : structures complexes, cuir, caoutchouc

- Les caractérisations sont réalisées dans le but d'identifier la composition des ordures ménagères, et de suivre l'évolution des principaux composés au cours du procédé. Au vu du nombre élevé de caractérisations à effectuer, dans une durée restreinte, seuls les constituants les plus pertinents pour le procédé de compostage, seront suivis.

- la **quantité d'échantillon** analysée est fonction de l'avancement du procédé. Pour la caractérisation des déchets urbains, des études recommandent un échantillon de poids variant de 90 Kg à 135 Kg [Brinton 1972, Klee *et al.*, 1970, Lohani *et al.*, 1988 dans Aloueimine *et al.*, 2005]. D'autres méthodes préconisent la sélection de 100 à 200 Kg de déchets après un quartage successif d'une charge entière de camion [Senes Consultants Limited, 1999]. La méthode MODECOM© recommande une prise d'échantillon de 500 Kg après quartage afin de limiter les erreurs de mesure [Tezanou *et al.*, 2001 ; Ademe, 1993]. Au fur et à mesure de l'homogénéisation et de la réduction granulométrique, la quantité prélevée diminue pour faciliter le tri des différents constituants. Le Tableau 25, indique les prises d'échantillon pour l'usine B quelle que soit la méthode employée.

Tableau 25 : Exemple de la quantité d'échantillon à trier (Kg)

<i>Étapes</i>	<i>Humide</i>	<i>Sec</i>
Déchets bruts	300	60
Déchets triés	100	20
Déchets calibrés	100	30
Refus de calibrage	100	50
Déchets en andains	50	30
Compost « coarse »	50	30
Compost « fine »	50	50
Refus d'affinage	50	30

II.1.5. Inertes

Les tests des inertes reflètent la somme des contaminants non biodégradables (plastiques, verre, métaux..). Ils sont réalisés sur la partie la plus **fine < 20 mm** de chaque échantillon selon la récente norme Afnor NF U 44-164 de janvier 2004. D'autres modifications ont été apportées : la séparation granulométrique est réalisée sur maille carré de **9,5 et 2,8 mm de côté**. Cette méthode est également préconisée aux Etats - Unis par le « US compost Concil », qui recommande un tri manuel après tamisage à 4 mm pour séparer les plastiques. La sélection de ces diamètres de mailles est due aux contraintes d'équipements sur place. La durée des bains de javel et leurs nombres ont été augmentés afin de favoriser une meilleure dégradation de la M.O puisque l'analyse est réalisée sur une fraction de granulométries < 20 mm. Quatre bains pendant 2, 4, 14 et 24 heures sont réalisés dans la solution de chlore obtenue à partir d'hypochlorite de calcium.

II.2. Analyses chimiques

Après une séparation granulométrique et un tri manuel des différents constituants, un échantillon représentatif de chaque fraction granulométrique de constituants est prélevé pour réaliser des analyses chimiques, par exemple les matières fermentescibles de granulométrie, >100, puis 100-50, puis 50-20 et enfin < 20 mm.

II.2.1. pH

La détermination du potentiel hydrogène, pH, est effectuée sur des suspensions aqueux selon la norme afnor NF ISO 10-390 de novembre 1994. Une masse de 20 g de matière sèche est mise en solution dans 100 mL d'eau distillée. La suspension est homogénéisée par agitation magnétique pendant 15 minutes. La mesure de pH ($\pm 0,1$ unité pH) se fait directement par lecture sur un pH-mètre à électrode combinée.

II.2.2. Humidité et matière sèche

L'humidité (H%) doit être déterminée le plus rapidement possible, pour limiter les pertes par évaporation. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour sa détermination : la méthode normée à l'étuve ou ses variantes en fonction de la température, la thermo-balance, le séchage à l'air libre.

La méthode normée Afnor NF U 44-171 d'octobre 1982, consiste en un prélèvement d'une quantité maximale d'échantillon, de préférence une masse supérieure à $100 \pm 0,1$ g, mise à l'étuve à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à poids constant, environ 24 heures. La matière sèche (MS%) est le taux complémentaire du degré d'humidité.

$$\%MS = \frac{[M_0 - M_1] \times 100}{M_0}$$

$$H\% = 100 - \%MS$$

Soit

- M_0 : masse de l'échantillon brute (g)
- M_1 : masse de l'échantillon après passage à l'étuve (g)
- %MS : pourcentage de matière sèche contenu dans l'échantillon
- %H : pourcentage d'humidité contenu dans l'échantillon

Certains auteurs préfèrent sécher les déchets ménagers à des températures plus basses, afin de ne pas détériorer les composés organiques comme les sucres ou les plastiques. Des températures de séchage de 75°C [Das *et al.*, 2002], 80°C [Morvan, 2000], 85°C [Brewer & Sullivan, 2003], 105°C

[Garcia, 2005] sont rencontrées dans la littérature. A poids identique, la durée de l'analyse est d'autant plus longue que la température de séchage est basse : 24 heures à 105°C et 48 heures à 80°C ($\pm 2^\circ\text{C}$).

La thermo-balance utilisée est un dessiccateur Precisa HA300. Il se compose : d'une balance de précision ± 1 mg, d'un système de chauffage avec deux lampes infra rouge, d'un clavier de programmation permettant de régler différents paramètres de l'analyse (température, intensité de chauffage...). Contrairement au séchage à l'étuve où l'eau subit une simple vaporisation, le séchage par thermo-balance est un processus accéléré grâce au rayonnement infra-rouge. L'intérêt de ce type de chauffage provient de son efficacité énergétique, permettant un transfert homogène d'énergie et une élévation de température plus rapide, donc un gain de temps et un séchage uniforme. Un calculateur intégré traduit directement la perte de masse en pourcentage de matière sèche. Les paramètres d'utilisation de la thermo-balance, ont été optimisés par plusieurs séries d'analyses regroupant 25 mesures. Les critères d'optimisation sont : l'intensité de chauffage à 2, 5, 10, 15 et 20, la masse de la prise d'essai entre 2 et 10 g et le temps d'analyse. Les paramètres optimaux retenus correspondent à une intensité de 15, une masse d'échantillon de 5 g pour une durée de chauffage de 45 minutes.

Pour les essais de mise au point de méthodes alternatives, un séchage à l'air libre est réalisé avec une masse de 1 Kg de compost que l'on étale sur des bâches. Les échantillons séjournent ainsi une semaine en extérieur couverts la nuit afin de limiter une humidification.

II.2.3. Mesure de la teneur en matière organique

Une masse voisine de $50 \pm 0,1$ g est calcinée à 550 °C, pendant 2 heures dans un four (NF U 44-160 de novembre 1985). Les analyses sont doublées. Le pourcentage en matière organique totale (MOT%) ou en solide volatil est obtenu par différence de pesée entre la masse de l'échantillon séché à 105 °C et la masse de l'échantillon après calcination. On peut en déduire le pourcentage de MOT dans l'échantillon sec et brut.

$$\%MOT = \frac{[M_1 - M_2] \times 100}{M_1} \quad \text{dans l'échantillon sec}$$

$$\%MOT = \frac{[M_0 - M_2] \times 100}{M_0} \quad \text{dans l'échantillon brut}$$

Soit

- M_0 : masse de l'échantillon (g)
- M_1 : masse de l'échantillon après passage à l'étuve (g)
- M_2 : masse de l'échantillon après calcination (g)
- %MOT : pourcentage de matière sèche contenue dans l'échantillon

La majorité des protocoles fixe la calcination à une température de 550 °C, cependant la durée du chauffage est variable. Elle peut être de 20 minutes, de 2 heures ou de 60 heures [François, 2004]. Ces différences sur la durée de chauffage influencent directement la valeur de la teneur en matière organique. Il est donc préférable de comparer des résultats issus de protocoles identiques.

II.2.4. Carbone

Les deux principales méthodes pour déterminer la teneur en carbone organique d'un échantillon de compost consistent à une oxydation par voie sèche ou par voie humide.

La première, est celle de Walkey et Black (1934) rapportée par François (2004). La matière organique est oxydée à froid par un excès de bichromate de potassium (1 M) en milieu acide (H₂SO₄). Le bichromate n'ayant pas réagi avec la matière organique est réduit par un excès de fer (II) (solution de sulfate double de fer ferreux et d'ammonium à 0,5 N) dosé en retour par du bichromate (1 M). Les teneurs sont déduites en considérant 77 % du carbone organique total oxydé, et l'approximation que 1 mL de bichromate correspond à 3 mg de carbone organique. Le pourcentage de carbone organique mesuré dans les déchets peut-être estimé à partir de la formule suivant :

$$\%C_{org} = [x + (10 - y)] * 0,003 * \left(\frac{100}{77}\right) * \left(\frac{100}{m}\right)$$

Avec

- m : masse de déchets (g)
- x : volume de bichromate versé (mL)
- y : volume de bichromate servant à titrer la solution de sulfate double de fer ferreux et d'ammonium ou sel de Mohr

Le protocole indique des prises d'échantillon faibles comprises entre 0,125 à 1 g de déchets de façon à ce que le bichromate utilisé soit réduit à 75%.

La seconde, est une méthode d'oxydation à chaud, selon la norme Afnor NF ISO 14235. Le carbone organique est oxydé dans un mélange de solution de bichromate de potassium (0,27 mol/L) et d'acide sulfurique concentré à une température de 135°C. Les ions bichromate sont réduits en ions Chrome III. L'intensité de la couleur des ions Cr VI en excès est mesurée par spectrométrie à une longueur d'onde de $\lambda = 585$ nm et comparée à une courbe étalon réalisée dans les mêmes conditions avec du glucose anhydre. La teneur en carbone organique du compost, celle en eau de l'échantillon étant connue est calculée selon la formule :

$$C = \frac{C_1}{M_0 \times 100} \quad (\text{g de carbone / kg de Ms compost})$$

Avec

- C_1 : masse de carbone organique trouvée dans la prise d'essai par rapport à la droite d'étalon du glucose (mg)
- M_0 : masse sèche de l'échantillon pour l'essai (g)

Ces deux méthodes ont été employées dans l'étude : la première sur le site B et la seconde sur le site C, en fonction des moyens disponibles.

II.2.5. Teneur en azote

II.2.5.1. Azote Total Kjeldhal (NTK)

L'azote NTK, somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique, est mesuré selon la norme Afnor ISO 11261, juin 1995. Les échantillons séchés à 105°C sont minéralisés dans un « minéralisateur » pendant 1 heure à 180°C puis pendant 2 heures à 360°C en milieu acide et en présence d'un catalyseur (K_2SO_4 et Se). Les résidus obtenus après digestion sont distillés après neutralisation de l'excès d'acide par la lessive de soude 30%. Le distillat est récupéré dans un erlenmeyer avec de l'acide chlorhydrique (0,1M). Le dosage réalisé avec de la soude (0,1M) et du rouge de méthyle permet de déterminer les teneurs en azote de l'échantillon. Les masses d'échantillons analysées sont faibles de l'ordre de 0,1g. Les essais ont déterminé la quantité d'échantillon, la mieux adaptée, en fonction du stade de maturation. Cette masse s'échelonne entre 0,1 à 1g. Plus la quantité d'échantillon est importante, plus la durée de minéralisation devra être augmentée. Pour une quantité de 0,1g, la durée de minéralisation est d'une heure à 180°C et de deux heures à 360°C. La teneur en azote NTK est exprimée à $\pm 0,1$ mg N-NTK/ Kg Ms.

$$N - NTK = \frac{(V_1 - V_0) \times 0,014 \times C \times 1000}{M} \quad (\text{mg N-NTK/ Kg MS})$$

Avec

- V_0 : volume de la solution de soude utilisé pour l'essai à blanc (mL)
- V_1 : volume de la solution de soude utilisé pour le dosage de l'échantillon (mL)
- C : concentration de la solution de soude utilisée lors du titrage (mol/L)
- M : masse de la prise d'essai (g)

II.2.5.2. Nitrate, nitrite et ammonium

Les ions nitrate, nitrite et ammonium sont mesurés par l'utilisation du kit commercial, Dr Lange, respectivement : LCK 339, de gamme 1-60 mg NO_3^-/L , LCK 342 de gamme 2-20 mg NO_2^-/L , LCK

303 de gamme 2,5-60 mg NH₄⁺/L. Les déchets en fermentation sont tamisés sur une maille carrée 10 mm. Une suspension de compost à 20 g/L est préparée avec de l'eau distillée, agitée pendant 20 minutes, puis laissée décanter 1 heure avant la réalisation de l'analyse.

II.2.6. Rapport C/N

L'évolution du rapport C/N est souvent considérée comme indicateur d'une bonne dégradation d'un substrat organique solide au cours de la fermentation. Ce rapport C/N est calculé à partir des valeurs de C_{org} mesuré par oxydation et de la quantité d'azote N mesurée par la méthode NTK.

II.2.7. Méthode de détermination de la teneur en métaux

Les échantillons sont minéralisés à chaud avec de l'eau régale (1/3 HNO₃+2/3 HCl) selon la norme Afnor NF ISO 11 460 de juin 1995. Le compost est séché à 105°C puis broyé. Compte tenu des interférences observées au cours du dosage, et de la masse de l'échantillon très faible (0,1g), les analyses sont dupliquées. Les échantillons sont chauffés à 100°C pendant une heure puis à 135 °C jusqu'à évaporation de l'acide soit environ pendant 3 heures. Un ajout d'eau distillée permet de ramener le volume à 50 mL. Les échantillons sont ensuite filtrés à 0,45µm.

Les concentrations en métaux sont mesurées, soit par spectrophotométrie d'absorption atomique four pour la majorité des métaux, soit par spectrophotométrie d'absorption atomique flamme pour le zinc. Le mélange gazeux employé pour la flamme est de l'air-acétylène. L'appareil mesure la différence d'intensité entre le rayonnement incident et celui transmis. L'application de la loi de Beer-Lambert intégrant cette différence permet d'accéder à la concentration du composé. La limite de détection de ces deux méthodes est variable en fonction de l'élément dosé.

II.2.8. Autres

Le dosage du NaCl est réalisé sur un extrait aqueux de compost en plaçant une masse de 20 g de matière sèche en contact dans 100 mL d'eau distillée, sous agitation pendant 15 minutes puis filtration sur filtre Whatman 0,45 µm. Un prélèvement de 2 mL de cette solution, dans 20 mL d'eau distillée, est titré par une solution de nitrate d'argent avec du chromate de potassium comme indicateur coloré.

II.3. Analyses biologiques

II.3.1. Tests de maturité

Les tests de maturité d'auto-échauffement et de colorimétrie de type Solvita® ont été effectués sur les déchets, les matières en cours de fermentation et les composts. Les échantillons sont tamisés à 10

mm. Leur humidité est ajustée à une valeur obtenue par le test dit « de la poignée » [F.C.Q.A.O, 1994].

Ce test est décrit par une norme allemande (F.C.Q.A.O, 1994). Un vase Dewar de 1,5 L et de 10 cm de diamètre intérieur est complètement rempli par l'échantillon sans tassement actif. Le vase ouvert à son sommet contenant l'échantillon est placé dans une chambre thermostatée ($20 \pm 1^\circ\text{C}$). La température à l'intérieur du vase est mesurée par un thermomètre dont le capteur est situé à environ 20 cm sous la surface du compost. La durée du test est de 10 jours. La température maximale atteinte (T_{max}) permet de connaître le degré de maturité du compost. Cet indice Dewar varie de I (température maximale supérieure à 60°C) pour un compost assimilé à de la matière brute, à V (température maximale inférieure à 30°C) pour un compost considéré comme mûr et fini. Le Tableau 26 reprend les données du test.

Tableau 26 : Valeurs de l'indice Dewar en fonction de la température maximale atteinte

	<i>Compost frais</i>				<i>Compost fini</i>
T_{max} ($^\circ\text{C}$)	60-70	50-60	40-50	30-40	< 30
<i>Indice Dewar</i>	I	II	III	IV	V

Le test colorimétrique de type Solvita® est utilisé en suivant les recommandations du fabricant (Woods End® Research Laboratory, USA). L'échantillon est placé dans un récipient hermétiquement fermé, environ 100 mL d'échantillon dans un récipient de 250 mL, contenant deux indicateurs colorés. Le premier indicateur mesure le carbone minéralisé et réagit en fonction de l'intensité de dégagement de CO_2 . Le second mesure l'intensité du dégagement de NH_3 . Les deux indicateurs colorés sont « lus » après 4 heures et comparés à deux gammes d'intensité de couleur notées de 1 à 8 pour le dioxyde de carbone et de 1 à 5 pour l'ammonium. La compilation de ces deux nombres donne un indice de maturité, indice Solvita® compris entre 1 pour le compost frais à 8 pour le compost mûr, comme le montre le tableau suivant.

Tableau 27 : Grille de détermination de l'indice de maturité Solvita® en fonction des indices CO_2 et NH_3

		CO_2 Solvita								
		CO_2 élevé				CO_2 faible				
		1	2	3	4	5	6	7	8	
NH_3 Solvita	NH_3 élevée	5	1	2	3	4	5	6	7	8
		4	1	2	3	4	5	6	7	8
	NH_3 faible	3	1	1	2	3	4	5	6	7
		2	1	1	1	2	3	4	5	6
		1	1	1	1	1	1	2	3	4

Les tests de germination du cresson [Spohn, 1968] permettent d'évaluer qualitativement la phytotoxicité du compost. Ils sont réalisés selon la norme Afnor NF XP U 44-165 de février 2004. Le témoin a été modifié : la tourbe est remplacée par du « **sandy soil** », sol fréquemment rencontré pour l'agriculture dans le pays du site B.

II.3.2. Tests de respirométrie

Le compost est dégradé par fermentation aérobie. Le substrat sert de source de carbone organique aux micro-organismes en présence d'oxygène. Le gaz carbonique (CO₂) est le produit principal de cette réaction. Cependant, si le milieu vient à manquer d'oxygène (O₂), une anaérobiose se crée modifiant ainsi la réaction. Le processus de méthanisation peut démarrer aussi, produisant du dioxyde de carbone et du méthane (CH₄).

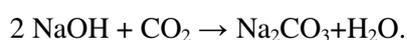
II.3.2.1. Analyseur de gaz

L'analyseur de gaz employé est de la marque INNOVA Air Tech Instruments. Il aspire l'air contenu dans une enceinte à l'aide d'une pompe de débit. L'eau est retirée de cet air en traversant un tube Nafion®, contenant une membrane filtrante et des cristaux de silice. L'eau doit être éliminée car elle perturbe les dosages des gaz. L'air est ensuite aspiré jusqu'à l'analyseur multi-gaz piloté par informatique et relié à un intégrateur enregistrant les données.

La masse volumique est déterminée en remplissant un bécher de 1L (préalablement taré) avec du compost. La masse obtenue correspond à la masse volumique du compost en g/dm³. Une masse m de compost humide à 60% (teneur en eau idéale pour le processus) est introduite dans un flacon de volume V . Le rapport masse (g) / volume (mL) doit être environ de 0,08. Par exemple $m_c = 100$ g de compost pour un volume de bouteille de $V_{\text{bouteille}} = 1\ 180$ mL. La bouteille est fermée hermétiquement et placée à température ambiante, à l'obscurité, dans un vase en polyester limitant les échanges gazeux. L'acquisition lancée l'analyse s'effectue pendant 5 jours. Les résultats sont traités sous forme de pourcentage, convertissable en concentration : mg/Kg de MS.

II.3.2.2. Demande Biologique en Oxygène par méthode manométrique

La mesure de la Demande Biologique en Oxygène obtenue (DBO) a été facilitée par l'emploi d'Oxitop® WTW, permettant d'enregistrer chaque jour la valeur d'O₂ consommée. Cet équipement permet une mesure manométrique par différence de pression. Elle estime la consommation d'oxygène lors de la fermentation aérobie. Cependant, pour que le CO₂ produit n'interagisse pas, il est neutralisé sous forme de carbonate de sodium (Na₂CO₃) par des pastilles de soude (NaOH) :



Ces équipements indiquent directement la valeur de la dépression en mg d'O₂ consommé par litre. Les déchets sont broyés avant introduction dans le flacon, d'une contenance de 500 mL.

II.4. Traitement informatique des données

II.4.1. Etude statistique des résultats

Afin de discuter les différents résultats obtenus, les paramètres statistiques retenus seront la moyenne, l'écart type, la variance et la classe modale. La moyenne se prête facilement aux calculs algébriques ainsi qu'aux tests statistiques. Elle est d'autant plus significative que la répartition de la série est symétrique et la dispersion plus faible. Cependant, elle est assez sensible aux valeurs anormalement petites ou grandes. Les paramètres de dispersion (écart-type et variance) permettent de mesurer les écarts des valeurs à la moyenne. Ces paramètres permettent de visualiser la plus ou moins grande dispersion des résultats. Enfin la classe modale est la classe ayant le plus grand effectif. (Il représente le sommet du pic lors d'une représentation graphique effectif = f (caractère étudié) si les valeurs suivent une loi normale).

$$\text{Moyenne } \mu = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} * x_i$$

$$\text{Ecart type } s \text{ d'un échantillon est égal à : } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}}$$

Les résultats obtenus au cours de la validation de la méthodologie sont traités par une méthode statistique, évaluant la marge d'erreur entre la méthode normalisée et la nouvelle méthode. Le « test de Student » sera utilisé pour valider ou non la méthode. Ces tests sont de plus en plus utilisés en biologie [Couty et al, 1999]. Ils reposent sur un principe simple : faire un choix entre plusieurs hypothèses possibles sans disposer d'informations suffisantes pour que le choix soit sûr. Une hypothèse initiale, notée (H₀), est vérifiée. La valeur prise par cette variable aléatoire est calculée à l'issue de l'expérience, en fonction de cette information l'hypothèse est validée ou non. Si le résultat obtenu conduit à accepter (H₀), le risque d'erreur est noté α qui représente la probabilité de se tromper quand (H₀) est écartée. Ce risque est fixé par l'utilisateur du test.

L'hypothèse est la suivante : sous (H₀), si X suit une loi normale alors la variable aléatoire « t » suit la loi de Student au degré de liberté (n₁+n₂)-2. Pour valider l'hypothèse, elle est comparée avec la

valeur trouvée dans la table de Student, n_1 et s_1 étant la moyenne et l'écart type des résultats de la méthode normée, n_2 et s_2 la moyenne et l'écart type des résultats de la méthode testée.

La valeur commune de l'écart type est estimée par :
$$\sigma = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Le « t » de Student se calcule alors :

$$t = \frac{x_1 - x_2}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

La conclusion dépend de la valeur du « t » ainsi calculée. Si « t » est supérieure au « t » lu sur la table de Student, alors l'hypothèse (H_0) est confirmée pour le risque α égal à 0,05.

Les tests sont réalisés sur une série de 25 mesures. Les valeurs suivent une distribution de Laplace-Gauss ou une loi quelconque si $n > 30$. La valeur du « t » lue dans la table de Student, pour un degré de liberté égal à 48 ($25+25-2$) et pour un risque α de 0,05, est de 2,021. L'hypothèse sera donc validée si la valeur du « t » calculée est inférieure à celle du « t_{48} » lue dans la table de Student.

II.4.2. Logiciel Bilco®

Le logiciel Bilco® développé par le B.R.G.M (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et commercialisé par la société CASPEO, facilite la réalisation des bilans d'usine. Il affine les bilans pondéraux, les bilans granulométriques et ceux par catégories de composants.

Un schéma de fonctionnement de l'usine est établi avec toutes les étapes du procédé. Il s'agit d'un plan de suivi de l'évolution des flux. Pour ce faire, il mentionne l'entrée et la sortie à chaque étape. Les schémas de fonctionnement des usines étudiées sont représentés dans le chapitre précédent. Le logiciel permet de séparer des étapes, qui dans la réalité ne le sont pas physiquement. Par exemple, le tube Dano® est séparé en tube et en trommel. Les données brutes recueillies sur l'usine (pesées, débit, analyses) sont introduites dans le logiciel, avec la précision sur les mesures. En effet, en raison des informations redondantes ou manquantes, et des nombreuses équations à traiter, il est difficile de boucler un bilan de fonctionnement. Le logiciel traite les données, fournit un bilan à chaque étape du procédé, et extrapole lorsque des données sont manquantes ou erronées. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux. Le logiciel ne peut pas rendre un bilan correct si les données sont insuffisantes.

Les analyses effectuées par ce logiciel ont pu être réalisées avec l'aide du Cemagref de Rennes puis complétées grâce à une version provisoire du logiciel prêtée par la société CASPEO.

Partie III : Résultats et discussions

Chapitre 1 : Elaboration des outils méthodologiques

Le premier type d'outils nécessaire concerne des supports d'expertises pour faciliter la réalisation de l'étude expérimentale sur site. La mise en oeuvre de la méthodologie nécessite un second type d'outils des techniques analytiques simples et rapidement adaptables. Dans les P.E.D, il est rare de trouver l'équipement suffisant pour les contrôles et les suivis analytiques au sein des usines de compostage en laboratoires extérieurs. Dans ce cadre, proposer une méthodologie d'expertise accompagnée d'outils analytiques s'avère appropriée notamment pour la détermination de l'humidité, de la quantité de matière organique ou l'évaluation de la maturité.

I. Mise au point des supports de la méthodologie

Une expertise d'un site comprend après la phase d'identification et de contacts préalables, diverses étapes telles que la visite du site, la consultation de documents et d'entretien avec tout le personnel. Une vue globale sur l'ensemble du procédé de compostage permet de mieux le comprendre. Le but est d'en apprécier les points forts et les points faibles. Les principaux paramètres considérés lors des expertises sont avant tout technologiques et économiques, mais aussi environnementaux. La réalisation d'une expertise passe par l'utilisation de différents outils, élaborés dans le cadre d'une étude sur les usines de compostage des déchets urbains implantées dans les P.E.D. Ces outils spécifiques se veulent volontairement les plus exhaustifs possibles pour être adaptables à tous les types de déchets (déchets ménagers, déchets verts etc.), à tous les types de procédés (rudimentaire ou sophistiqué), quel que soient le pays ou le climat.

Plusieurs supports ont été élaborés afin de faciliter la réalisation des expertises et d'analyser tous les paramètres essentiels. Ils se divisent en quatre catégories : questionnaires, cahier d'analyses, support d'expertise et cahier de recommandations. Certains documents fournis par l'exploitant accompagnés d'entretiens avec le personnel complètent ce schéma d'analyse. Ces outils sont présentés en annexe 1.

I.1. Prise de contact

L'usine étant identifiée, il faut alors prendre contact avec les principaux services responsables concernés. Dans un premier temps, le poste économique de l'ambassade de France, dans le pays concerné, est sollicité. Les premiers contacts, par courrier électronique, permettent d'obtenir des renseignements généraux sur la gestion des déchets et le compostage des ordures ménagères en particulier, dans le pays. Dans la mesure du possible, une liste des usines de compostage référencées est demandée pour confirmer ou infirmer le choix. La littérature ne recense pas toutes les usines de compostage à travers le monde. Il est probable que certaines usines aient des caractéristiques plus intéressantes que celles initialement retenues. Ce choix étant rectifié ou non, l'exploitant est contacté par courriel puis par téléphone, afin de définir les objectifs et l'intérêt du programme international de l'Ademe. Un dialogue est alors instauré. La mission économique joue le rôle d'intermédiaire, facilitée par sa localisation et la maîtrise de la situation économique. Ces échanges sont la base du dialogue avec les responsables de l'exploitation. Les différents questionnaires sont envoyés à l'exploitant. Au retour de ceux-ci, le procédé de compostage est mieux appréhendé, et conforte la sélection de l'usine. Une proposition de convention est envoyée à l'exploitant. Elle définit les objectifs, les modalités, le rôle de chaque acteur et les réserves de confidentialité de l'intervention sur site. La convention signée

résulte des négociations entre les différentes parties. L'expertise sur site peut alors être programmée dans le temps.

En parallèle, d'autres institutions nationales sont contactées : Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Agriculture, Municipalité... Le projet doit s'inscrire dans un contexte de développement durable, un maximum de partenaires doit donc valider l'action menée dans un premier temps et l'intégrer dans leur politique nationale ou locale de gestion des déchets.

Une lettre et un dossier explicatif leur sont envoyés par courrier. En retour, une réponse de confirmation d'approbation du projet, leur est demandée. Par la suite, des contacts seront pris auprès des universités et des laboratoires d'analyses pour trouver l'appui analytique.

I.2. Questionnaires

Deux types de questionnaires ont été élaborés pour rassembler un maximum d'informations sur la gestion des déchets dans le pays et sur l'usine elle-même. Les questionnaires sont sous forme de choix multiples avec un maximum de réponses facilitant la rédaction par les personnes en charge de la gestion et de l'exploitation. Ils s'inspirent de la logique de la démarche qualité (ISO 14 000 ou 9 000) et des études réalisées par cette voie d'enquête dans le domaine de la gestion des déchets [Zurbrugg *et al.*, 2004 ; Dulac, 2001 ; Sandec, 2000].

Le premier est un questionnaire se rapportant au **contexte** de la gestion des déchets. Il reprend le contexte socio-économique et politique de l'implantation de l'usine. Il se divise en différentes parties concernant le contexte national et local, le choix de l'emplacement de l'usine. Il prend également en compte le type de collecte dans la ville concernée et la législation en vigueur dans le pays. Ce questionnaire sert à situer l'implantation de l'usine dans le contexte de la politique nationale et locale de gestion des déchets. Il renseigne également sur le marché agricole potentiel du compost et sur toutes les implications possibles : concurrence des engrais chimiques, image du compost auprès de la population, etc.

Le second est un questionnaire de **pré-expertise**. Il regroupe les informations directement liées au procédé de compostage et à son fonctionnement. Un procédé regroupe plusieurs étapes disposées différemment sur la chaîne de traitement en fonction des usines. Le questionnaire rassemble la majorité de ces possibilités afin d'être le plus exhaustif. Il est divisé en 4 parties :

- l'**identification** et l'origine des entrants : flux des déchets des ménages et d'autres déchets collectés, composition approximative.
- le **procédé** : il précise les différentes étapes du traitement et permet de comprendre le choix chronologique des étapes. Un schéma de l'usine est demandé afin de mieux visualiser l'agencement de

cette dernière ainsi que la chaîne de traitement. Pour chaque étape, le flux des déchets, le procédé, le coût et la consommation d'énergie sont demandés.

- le **suivi** et le contrôle du procédé : ils permettent de connaître la fréquence et la nature des contrôles réalisés au cours du traitement. Pour chaque paramètre principal, le nombre, la méthode, la fréquence et les coûts des analyses sont demandés. Le niveau de qualité du compost en est déduit. (En effet, des contrôles réguliers assurent les conditions optimales de fermentation et par conséquent une qualité de compost.)
- les **débouchés** et impacts : ils permettent de s'assurer de l'existence d'un marché pour le compost et du faible impact de cette activité, sur l'environnement (eau, air, sol), sur le personnel ou sur les riverains.

Dans chacune de ces parties une évaluation du coût, du besoin en masse salariale et des flux massiques est prise en compte. Ces deux questionnaires sont remplis par l'exploitant ou par les autorités locales puis retournés complétés avant la réalisation de l'étude sur place. Avant l'expertise, il est nécessaire d'avoir connaissance de ces documents afin de justifier ou confirmer le choix de cette usine et d'appréhender le procédé avant de réaliser l'expertise. La méthodologie peut alors être ciblée sur les points sensibles qui ressortent des questionnaires.

Ces questionnaires donnent un aperçu général sur le procédé et ses dysfonctionnements. D'autres documents indiquent les frais de gestion et de fonctionnement, le flux de déchets et les résultats analytiques obtenus sur le compost. Ils peuvent être en possession de l'exploitant et mis à la disposition lors de l'étude. Toutefois, il est essentiel de **vérifier** tous les renseignements fournis : procédés, analyses, données financières et flux de déchets. La méthodologie considère autant les résultats analytiques, que les divers constats ou opinions du personnel. Un cahier d'analyses et des supports d'expertise permettent de croiser toutes ces données.

I.3. Cahier de protocoles et de méthodes analytiques

Au cours de l'étude, des analyses seront réalisées sur l'ensemble de la chaîne de production. Des prélèvements seront effectués à chaque étape du procédé pour suivre l'évolution des paramètres principaux et donc pour vérifier l'efficacité du procédé. Le cahier d'analyses rassemble les analyses à réaliser par étapes, indépendamment du procédé. Il intègre aussi les normes françaises décrivant les protocoles analytiques pour les différents paramètres, mais aussi d'autres protocoles alternatifs. Le but est de s'assurer de la validité des résultats fournis par les différents laboratoires et de pouvoir les comparer avec d'autres résultats analytiques de différentes usines.

La méthode d'analyse des échantillons prélevés est identique pour chaque étape du procédé. Un tri granulométrique des déchets est réalisé selon le protocole défini précédemment, puis chacune de ces fractions est triée en fonction des catégories de constituants. Ainsi, près de 200 échantillons différents

sont prélevés lors de l'étude. Leur identification précise et rigoureuse est essentielle pour limiter les erreurs. Un étiquetage systématique des échantillons est organisé avec une nomenclature spécifique pour chacun et variable en fonction de la chaîne de traitement étudiée, donc à réaliser après le retour des questionnaires par l'exploitant. Cette nomenclature, présentée dans le Tableau 28 est composée de 4 parties identifiant : la nature du déchet (son point de prélèvement), sa caractérisation sur déchets secs ou sur déchets humides, sa fraction granulométrique et enfin la catégorie des constituants, par exemple :

- DBs, 100-50,01 : Catégorie des fermentescibles des déchets bruts après caractérisation sur déchets secs, de granulométrie 100-50 mm.
- DCh, 100, 04 : Catégorie des matières plastiques des déchets criblés après caractérisation sur déchets humides, de granulométrie supérieure à 100 mm.

Tableau 28 : Nomenclature des échantillons prélevés sur la plate-forme de compostage d'ordures ménagères

	<i>Code</i>	
<i>Nature du déchet</i>	Déchets bruts	DB
	Déchets triés	DT
	Déchets criblés	DC
	Déchets en andains	DA
	Déchets fermentés	DF
	Compost « Fine »	CF
	Compost « Coarse »	CC
	Matériaux triés	MT
	Refus de criblage	RC
<i>Type de caractérisation</i>	Sur déchets secs	s
	Sur déchets humides	h
<i>Granulométrie</i>	> 100 mm	100
	100 à 50 mm	100-50
	50 à 20 mm	50-20
	< 20 mm	20
<i>Constituants</i>	Non triés	00
	Fermentescibles	01
	Papiers – cartons	02
	Textiles	03
	Plastiques	04
	Verres	05
	Métaux	06
	Inertes	07
	Autres	08

Cette nomenclature est **adaptable** en fonction du nombre d'étapes du procédé de compostage et des dimensions des mailles du crible ou de l'affinage.

I.4. Support d'expertise

Le support d'expertise se présente sous la forme d'un synoptique pour chaque étape du procédé : broyage, tri, fermentation, criblage..., de même pour les impacts environnementaux ou l'hygiène et la sécurité du site. Un exemple est présenté dans la Figure 10.

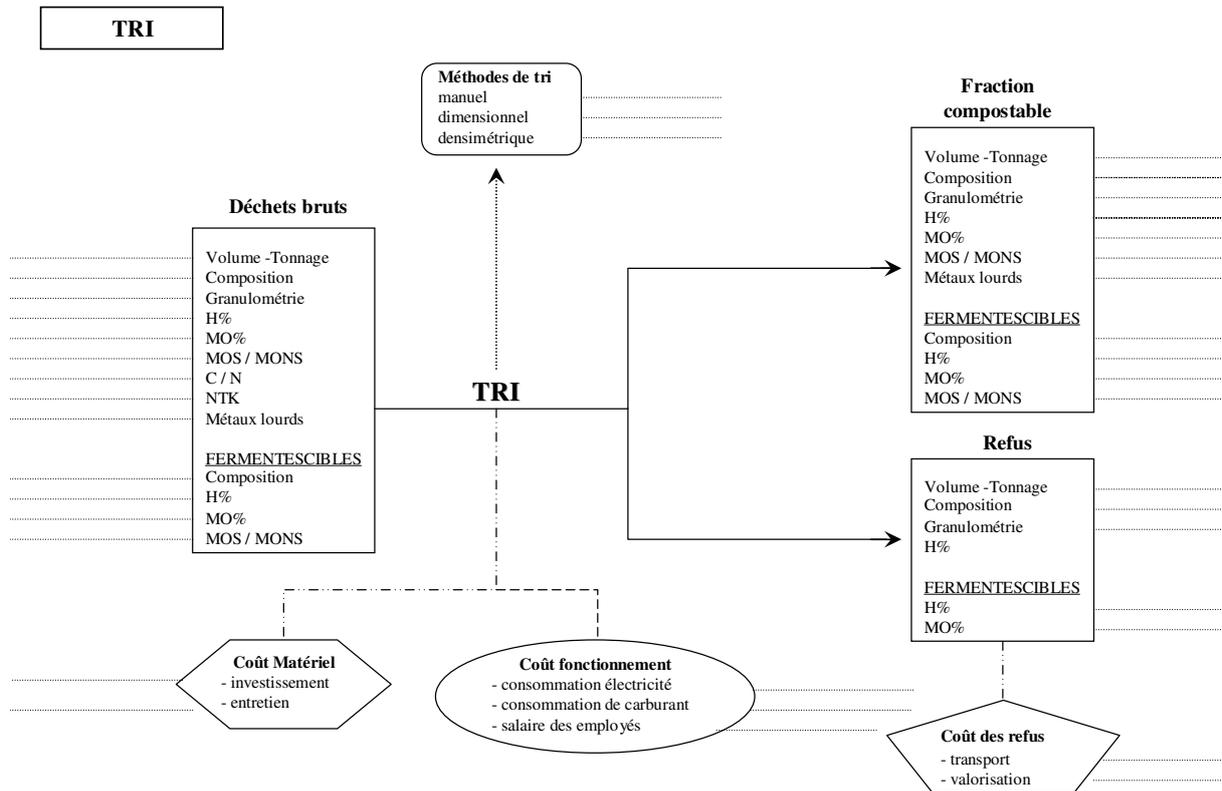


Figure 10 : Exemple de support d'expertise cas de l'étape du tri manuel

Ces synoptiques intègrent les différents types d'analyse à effectuer et mettent l'accent sur les différents points de dysfonctionnement. Cette présentation très synthétique facilite la prise de note lors de la réalisation de l'expertise sur site. Des informations complémentaires peuvent être aussi relevées concernant l'énergétique, l'entretien, le personnel, les coûts de gestion des refus etc. ...

I.5. Cahier de recommandations

Le cahier de recommandations permet la synthèse de tous les documents et informations recueillis lors de l'expertise. L'analyse de toutes ces données identifie les points forts et les points faibles du procédé, permet donc de proposer des améliorations et des recommandations. Il traite toutes les données recueillies lors de l'expertise en les classant en différentes catégories : présentation du site,

sensibilité du milieu, description des entrants (déchets urbains, eau, carburant, électricité), descriptif du procédé, impacts sur l'environnementaux, hygiène et sécurité, coût du procédé.

En annexe de ce cahier de recommandations figureront toutes les analyses complémentaires effectuées. Ce cahier est remis à l'exploitant et aux autorités locales comme trace de la réalisation de l'étude. Il synthétise toutes les données recueillies et propose des recommandations d'amélioration, des voies de transformation pour optimiser le procédé en place.

II. Mise au point des méthodes analytiques

Les essais ont été réalisés sur des échantillons prélevés sur le site A, l'usine de compostage de déchets verts, à chaque étape du procédé de dégradation. Plusieurs paramètres sont testés dans le but de mettre en oeuvre des pratiques alternatives aux méthodes normées. Les méthodes optimisées portent sur la détermination de l'humidité, de la matière organique, mais également sur l'évaluation de la maturité du compost par des tests respirométriques.

II.1. Humidité

La mesure de l'humidité (H%), sur des déchets bruts et en phase de dégradation, a été étudiée pour comparer plusieurs protocoles :

- Méthode normée à 105°C
- Méthode à 80°C
- Séchage à l'air libre
- Thermo-balance

II.1.1. Efficacité de la thermo-balance

Les résultats des 25 mesures effectuées dans les conditions définies dans la partie II sont indiqués dans le Tableau 29. Une masse voisine de 5 g est utilisée dans les deux méthodes.

Tableau 29 : Résultats des essais comparatifs entre la méthode normée et la thermo-balance

	<i>Thermo-balance</i>	<i>Méthode normée</i>
<i>Moyenne</i>	43,28%	44,22%
<i>Ecart type</i>	0,9751	0,9674
<i>Variance</i>	0,9508	0,9359
<i>Min</i>	41,73%	42,55%
<i>Max</i>	45,43%	46,79%

Les deux moyennes obtenues sont proches à 2,1% près. Cette différence peut s'expliquer par l'influence de deux facteurs : d'une part, le caractère volatil de certains composés organiques à forte

température qui engendre des pertes de masse supplémentaire et d'autre part le caractère très hétérogène du compost. Cependant, le premier facteur est essentiellement responsable de cette différence, la méthode thermo-gravimétrique est en effet beaucoup plus violente que la méthode normée. Cette dernière permet à l'échantillon d'atteindre une température maximale en quelques secondes induisant des pertes supplémentaires de composés par volatilisation, contrairement au séchage à l'étuve avec une montée en température progressive. En revanche quelle que soit la méthode l'écart type est identique. La représentation gaussienne des résultats, Figure 11, souligne les conclusions précédentes.

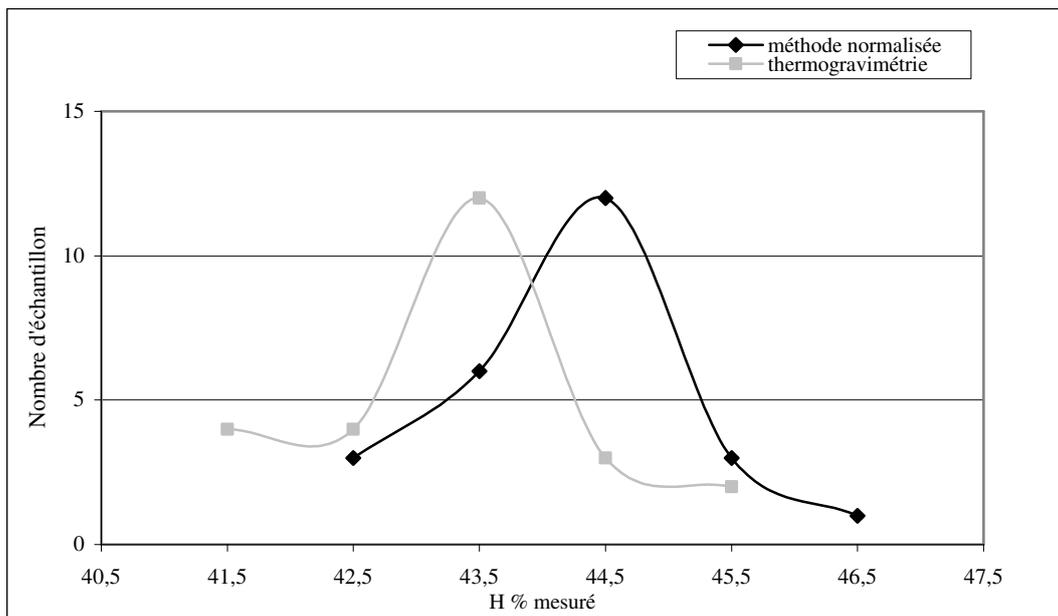


Figure 11 : Comparaison de la répartition des mesures d'humidité obtenues par la méthode normée et par la méthode de thermo-gravimétrie

Les deux courbes ont une allure similaire mais un phénomène de « décalage » est évident, traduisant la perte de matière organique par thermo-gravimétrie. La variation des mesures, pour chaque série, est voisine de 4%.

Le test de Student est utilisé pour valider la méthode. La valeur lue dans la table de Student est « t_{48} » = 2,021 pour un degré de liberté égal à 48 et pour un risque α de 0,05. Or « t » calculé est de 3,41, supérieur à la valeur de la table, donc l'hypothèse n'est pas valable dans les conditions définies à 5 % près. Pour autant, l'erreur relative entre les deux moyennes est proche 2,1%, laissant l'opérateur libre de choisir son utilisation en incluant cette erreur dans les résultats.

II.1.2. Comparaison des températures de séchage

Les résultats, présentés Figure 12, sont obtenus par un séchage à l'étuve d'une masse de 100 g étalée sur une feuille d'aluminium. Seule la méthode de séchage à l'air libre correspond à une masse de 1 kg étalée à l'extérieur pendant une semaine durant le mois de mai et recouvert la nuit.

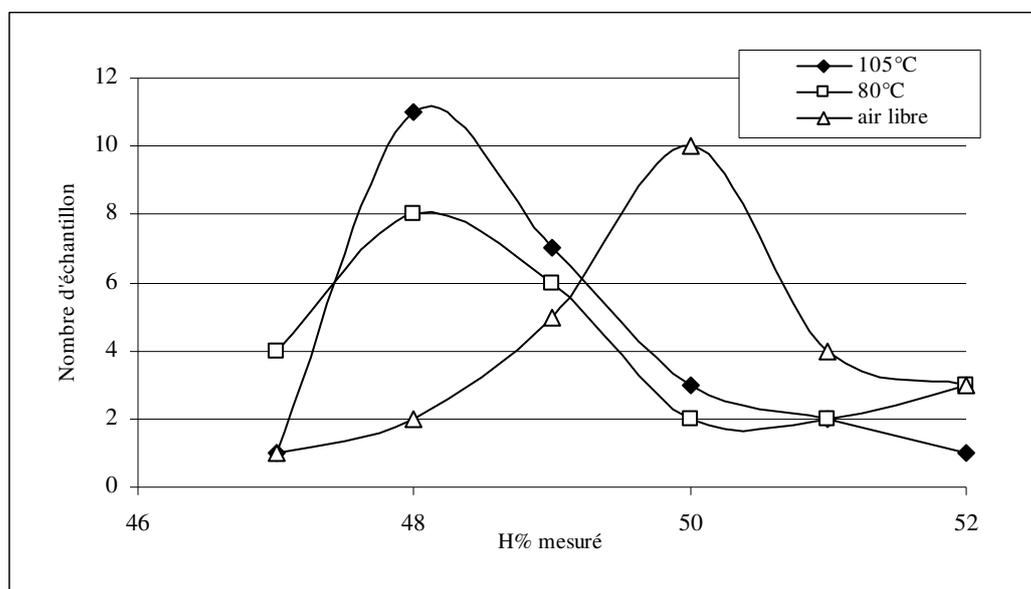


Figure 12 : Comparaison de la répartition des mesures d'humidité obtenues par la méthode normée, par la méthode de séchage à 80°C et par un séchage à l'air libre

La comparaison des courbes de répartition des mesures d'humidité est différente pour les trois méthodes :

- la méthode normée donne une courbe de type gaussienne centrée vers 48%.
- la méthode de séchage à 80°C indique une courbe plus étalée, également centrée vers 48%. A 80°C les résultats sont plus aléatoires. Les échantillons ne sont sans doute pas totalement secs après 48 heures à 80°C due à une humidité résiduelle dans les interstices, bien que la moyenne des résultats soit la même que la méthode normée.
- la méthode de séchage à l'air libre, présente une courbe dont le sommet est situé à 50% en humidité et dont l'étendue est relativement importante. Une erreur de 2% est notée par rapport à la méthode normée, provenant sans doute d'une montée en température trop faible pour évacuer l'eau interstitielle et l'eau liée à la matière dans le compost.

Les résultats statistiques « classiques » et tests de Student de l'étude sont donnés dans le Tableau 30. La moyenne des résultats de la méthode de séchage à 80°C et celle de la méthode normée sont quasiment identiques. Seule la moyenne du séchage à l'air libre est plus éloignée, bien que l'erreur soit plus faible avec cette dernière par rapport à la méthode de séchage à 80°C.

Tableau 30 : Résultats de la comparaison des températures de séchage

	<i>Norme</i>	<i>80°C</i>	<i>Air libre</i>
<i>Moyenne</i>	49,4%	49,5%	50,5%
<i>Ecart type</i>	1,13%	1,84%	1,45%
<i>Variance</i>	0,01%	0,03%	0,02%
<i>Min</i>	47,8%	45,4%	46,9%
<i>Max</i>	52,5%	53,4%	53,9%
<i>s</i>	-	1,527	1,300
<i>t</i>	-	0,232	2,992
<i>t₄₈</i>	2,021	-	-
<i>Hypothèse H₀</i>	-	<i>validée</i>	<i>réfutée</i>

L'analyse statistique des quatre méthodes de séchage des échantillons a permis de valider seulement le séchage à 80°C. Cependant, la validation de ce test porte uniquement sur la comparaison des moyennes des résultats obtenus. Si la conclusion du test de Student est totalement objective, son interprétation est subjective. La qualité d'une méthode analytique est jugée sur deux critères principaux : sa **justesse**, l'aptitude à fournir des valeurs proches de la valeur vraie et sa **fidélité**, l'aptitude à fournir des indications identiques lors d'analyses en conditions identiques. Ainsi, les résultats obtenus permettent de qualifier la méthode de la thermo-balance de fidèle, celle de séchage à 80°C de juste alors que la méthode par séchage à l'air libre ne correspond à aucun de ces critères.

L'une ou l'autre de ces méthodes sera entreprise en fonction des conditions de réalisation de l'analyse, bien que la méthode normée soit préconisée au vu du grand nombre d'analyses à effectuer lors de l'expertise. Un séchage à 80°C sera effectué lorsque le substrat devra être trié par la suite, par exemple pour le test des substances inertes. Par contre, si la quantité d'échantillon est trop importante, un séchage à l'air libre sera effectué en tenant compte du pourcentage d'humidité résiduelle et un facteur de correction sera alors appliqué aux résultats.

II.2. Matière organique totale

La mesure de la M.O.T est réalisée par perte au feu à 550°C dans un four. Mais dans le cas où il n'est pas possible de disposer d'un four, une méthode alternative est alors testée en plaçant un échantillon sec dans un creuset en porcelaine et chauffé au « bec bunsen » pendant quelques minutes. Après des essais, le temps de chauffage est optimisé à dix minutes. Le Tableau 31 présente les résultats des 25 mesures comparatives entre la méthode normée et la méthode au bec bunsen avec ou sans couvercle de porcelaine sur le creuset.

Tableau 31 : Résultats comparatifs des essais de détermination de la M.O.T (en %)

	<i>Méthode normée</i>	<i>Creuset couvert</i>	<i>Creuset non couvert</i>
<i>Moyenne</i>	57,8	57,5	53,6
<i>Ecart type</i>	1,7	6,0	10,2
<i>Variance</i>	2,8	36,5	104,4
<i>Min</i>	54,8	44,6	32,0
<i>Max</i>	60,5	74,3	72,9

La méthode de calcination sans couvercle donne des résultats éloignés de 10% de ceux fournis par la méthode normée en terme de moyenne. Par contre la méthode de calcination avec couvercle présente moins de 1% d'écart avec la méthode normée avec toutefois une étendue des erreurs plus importante, provenant d'un mauvais contrôle de la montée en température. Les représentations gaussiennes de chaque résultat sont reprises dans la Figure 13.

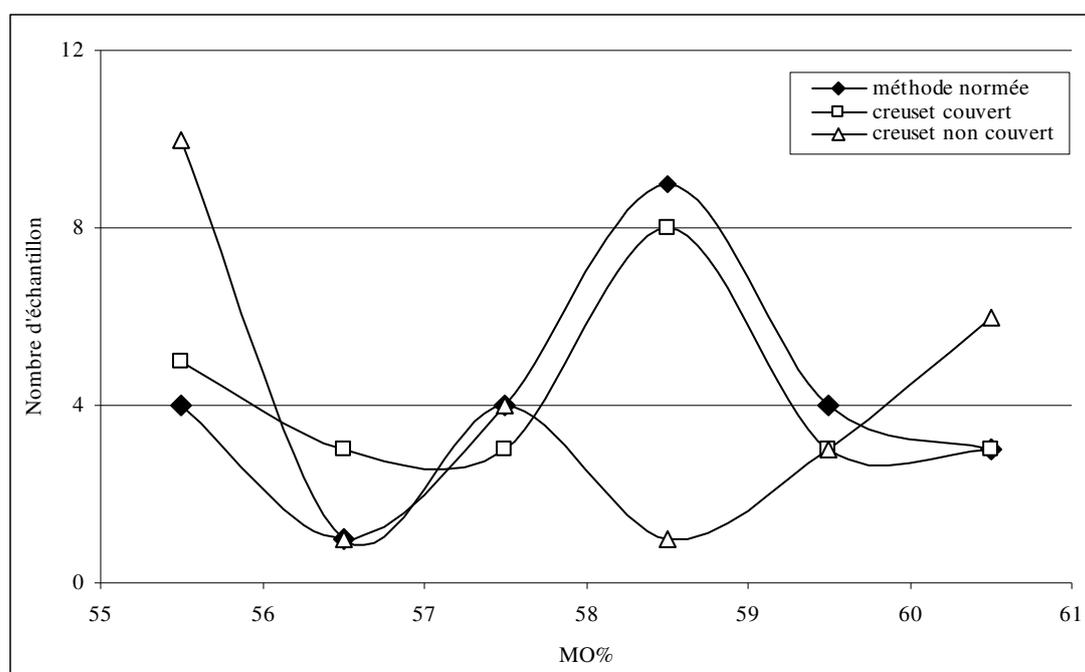


Figure 13 : Comparaison des méthodes de détermination de la MOT%

La courbe obtenue pour la méthode de calcination sans couvercle ne présente pas une allure gaussienne, elle peut donc être réfutée dès cette étape. La différence de 4,2% en MOT entre la moyenne et celle de la méthode normée, peut s'expliquer par deux origines. D'abord la montée en température ne peut pas être contrôlée et ensuite la perte d'échantillon par des envols de cendres dus au fonctionnement de la hotte aspirante, bien que réglée sur une faible puissance de ventilation. Par contre, l'allure de la courbe de calcination dans le creuset couvert est proche de celle de la méthode normée bien que plus étendue donc moins fiable.

Le test de Student pour la méthode de calcination avec couvercle donne un écart type « s » de 4,40 et un « t » de 0,24. Cette valeur comparée avec celle de référence permet de valider la méthode de détermination de la MOT%. Comme attendu, d'après l'allure de la courbe de la seconde méthode avec couvercle, le test de Student ne la valide pas, la valeur est supérieure à celle du « t_{48} » de référence lue dans la table de Student.

La méthode alternative de calcination avec un creuset en porcelaine couvert est utilisable en considérant l'erreur sur l'étendue des résultats donc sa fidélité. La résistance des creusets est apparue comme un inconvénient majeur de la mise en œuvre de cette méthode, à cause de la forte température du bec bunsen et de la durée de chauffage ils se sont fendus. Il est donc préférable d'employer la méthode normée, bien que cette méthode alternative soit valable pour une estimation rapide de la teneur en M.O.T.

II.3. Evaluation de la maturité

De nombreuses méthodes d'évaluation de la maturité par respirométrie existent [Francou, 2003, Rynk, 2003, Lasardi & Stentiford, 1998]. Parmi elles, le test de la demande biochimique en oxygène DBO permet de mesurer la quantité d' O_2 consommée par les bactéries dans un liquide sur plusieurs jours. Cette mesure s'exprime en mg O_2 consommé par litre. Adapter cette technique simple permettrait d'estimer l'activité des micro-organismes et par voie de conséquence l'état de maturité du compost directement sur site. Différentes techniques alternatives à cette mesure sont testées, puis comparées à des méthodes précises de laboratoire comme l'analyse de gaz, des tests colorimétriques de type Solvita® et des essais de montée en température.

II.3.1. Méthode de DBO adaptée

La consommation de l' O_2 est suivie en mesurant la pression partielle d'oxygène par une méthode manométrique de type Oxitop®. Dans un premier temps, des essais ont été menés sur des échantillons de compost solide. Les premières études sont consacrées à la détermination de la quantité d'échantillon adaptée et de son humidité. Puis, la méthode est testée sur une suspension de compost puisque la méthode manométrique est destinée en utilisation normale à un échantillon liquide.

II.3.1.1. Essais sur déchets verts en cours de dégradation

a) Facteur de corrélation

Cette méthode est habituellement employée pour des liquides. Le manuel d'utilisation prévoit un facteur de dilution, applicable en fonction du volume d'échantillon introduit. Connaissant le volume

total du flacon et le volume d'échantillon introduit, le volume d'air peut être déduit. Ainsi, le facteur de dilution est transposable au volume d'air dans le flacon selon l'équation suivante :

$$y = 0,5772 \times \exp 0,0087x$$

La densité du compost voisine de 0,4 permet de relier ce facteur de correction au compost pour connaître sa consommation en O₂, comme le rappelle le Tableau 32.

Tableau 32 : Facteur de dilution pour utiliser la méthode manométrique

Masse introduite (g)	Vol. solide (mL)	Vol. air (mL)	Facteur dilution selon équation
10	25	475	36
20	50	450	29
30	75	425	23
40	100	400	19
50	125	375	15

b) Sélection de la masse d'échantillon

Afin d'ajuster la masse d'échantillon à introduire, des essais sur des prélèvements de déchets verts en cours de fermentation du site A sont effectués. Chaque échantillon est dupliqué, l'analyse est testée dix fois dans des conditions similaires, les résultats sont présentés dans la Figure 5 .

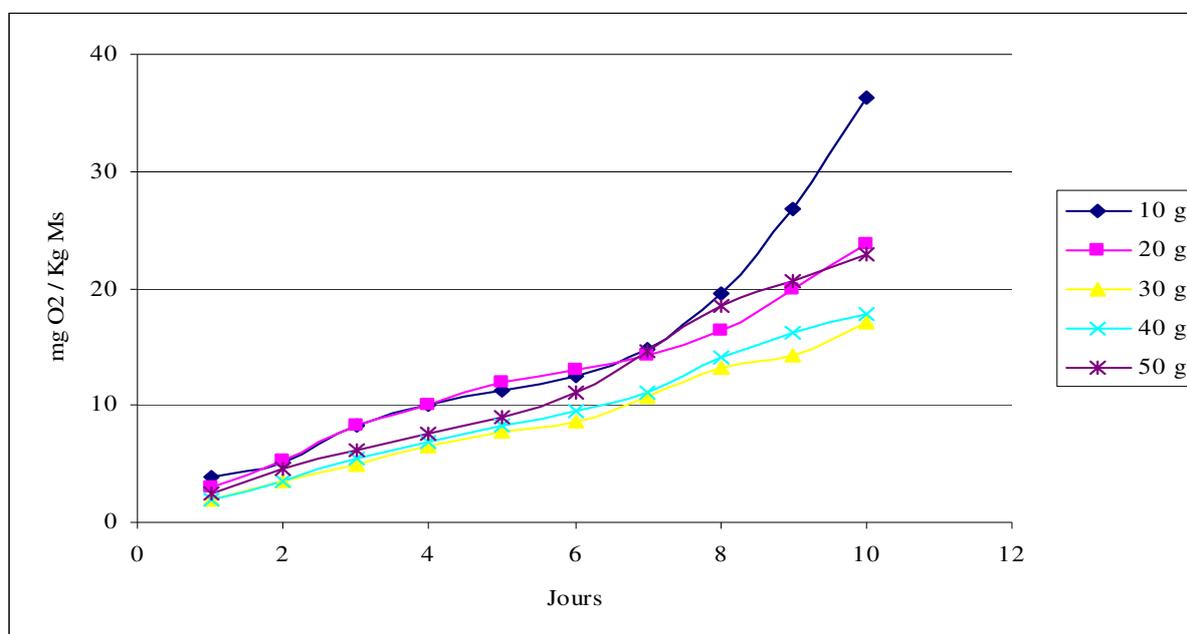


Figure 14 : Résultats de la DBO pour une variation de la masse d'échantillon

La figure précédente montre une augmentation linéaire de la consommation en O₂ sur 10 jours. Dans la pratique, une chute brutale est constatée à 6 jours, liée à l'ouverture des appareils et à leur réinitialisation pour une nouvelle série d'analyses pendant 5 jours. L'activité respiratoire est identique pour la deuxième série de mesures entre 6 et 10 jours, les courbes pour 20, 30, 40 et 50 g présentent une pente sensiblement identique à la première partie de l'expérience. La consommation d'O₂ est plus élevée dans la deuxième partie de l'expérience pour l'échantillon de 10 g, ce phénomène peut être attribué à un tassement moins important dû à la faible quantité d'échantillon et par conséquent à une meilleure aération. Après une période d'incubation représentée par les cinq premiers jours d'analyse, la consommation en O₂ est plus intense. Celle-ci provient de la reprise de l'activité microbienne de la totalité de l'échantillon, contrairement aux autres essais, où l'échantillon situé dans le fond du flacon est moins bien aéré.

La relation entre la masse introduite et l'intensité de la consommation en O₂ est variable. Elle augmente entre 10g et 30 g, puis diminue fortement pour des masses supérieures. Ce constat est sans doute lié à un effet de masse, dû à la non agitation des flacons, passant alors en fermentation anaérobie. Les essais avec des masses de 40 et 50 g ne sont donc pas retenus.

L'étendue des erreurs montre que l'écart est trop important pour des masses supérieures à 30 g. Bien que l'erreur relative pour une masse d'échantillon de 10 g soit faible, cette masse n'est pas retenue car jugée trop faible, donc peu représentative de l'échantillon. Les écarts types pour les essais à 20 et 30 g sont concluants, cependant, lors de la réalisation des analyses, de nombreux tests ont mal fonctionné pour la masse de 30 g. C'est pourquoi, pour la suite de l'étude une quantité de 20 g d'échantillon est utilisée.

c) Sélection de la teneur en humidité

L'humidité du substrat est un paramètre prédominant de l'activité des micro-organismes, qu'il est important de maîtriser. Après avoir séché l'échantillon à l'air libre pendant une journée, l'humidité est réajustée entre 25 et 60%. Les différents échantillons de 20 g ré-humidifiés sont introduits dans les flacons d'analyse, le reste de l'échantillon est placé à l'étuve à 105°C dans le but de contrôler sa teneur. Entre quatre et huit analyses sont réalisées par teneur en humidité testée, sachant que celles-ci sont toujours dupliquées. Les moyennes de ces résultats sont regroupées dans la Figure 15.

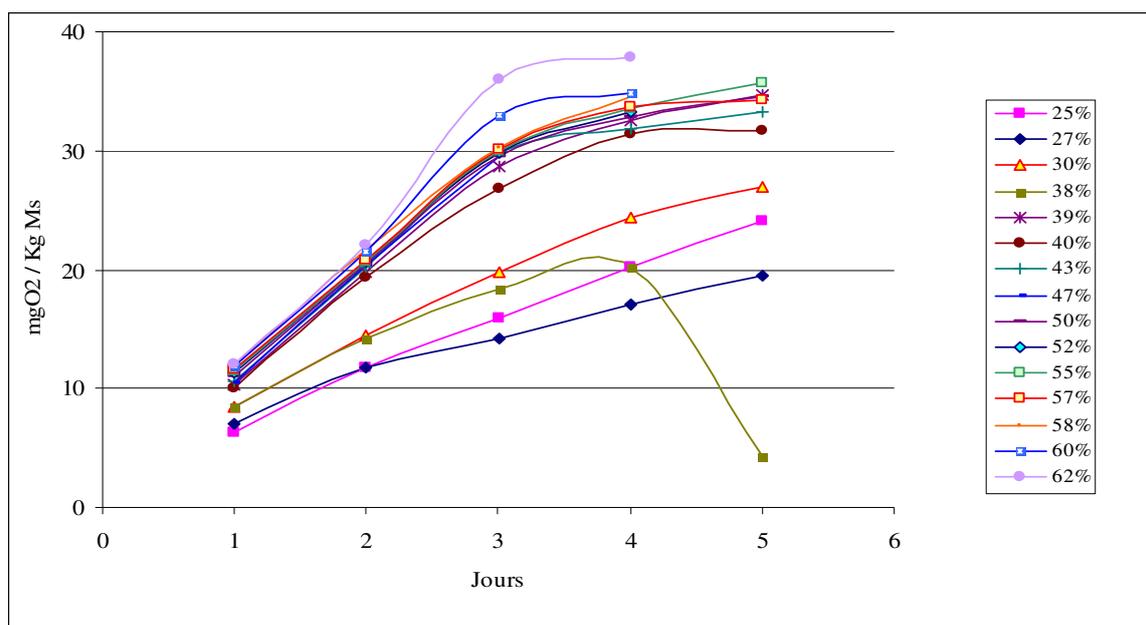


Figure 15 : Consommation d'O₂ en fonction des teneurs en humidité du substrat

L'augmentation des teneurs en humidité dans le substrat s'accompagne d'un accroissement de la consommation en O₂. Pour une humidité trop élevée, cette dernière est en dehors de la gamme de mesures de l'appareil. Les teneurs extrêmes d'humidité présentent un écart type non négligeable et irrégulier. Une teneur en humidité située entre 45 et 55% indique des écarts types faibles. Il est difficile de donner une valeur de l'humidité adaptée plus précise, les écarts entre les résultats étant trop faibles. De plus lors du réajustement de la teneur en eau, il est difficile d'affiner l'humidité à la valeur souhaitée. Après passage à l'étuve pour contrôle, les teneurs en humidité sont plus faibles que prévue, c'est pourquoi la gamme d'humidité s'étend de 25 à 60% et la gamme retenue pour les essais sur le suivi de la fermentation se situe entre 45 et 55%.

Un second contrôle de la teneur en humidité est effectué après les 5 jours de fermentation. Une augmentation de 1 à 2% est constatée pour chaque échantillon, correspondant au produit de la dégradation biologique dégagement de CO₂, piégé dans le flacon par de la potasse mais aussi de la vapeur d'eau qui se condense. Ce qui représente une augmentation en eau de 3 à 4% par rapport à la masse sèche de compost.

d) Validation de la mesure

Le protocole définit précédemment, une masse de 20 g ayant une teneur en humidité comprise entre 45 et 55%, est testé afin de confirmer la fiabilité et la justesse de la méthode d'évaluation de la consommation en O₂. N'ayant pas de méthode normée ni de référence sur cette méthode, le test de

Student ne peut être utilisé pour valider cette analyse. Un même échantillon est donc étudié plus de 30 fois dans ces conditions, les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 16.

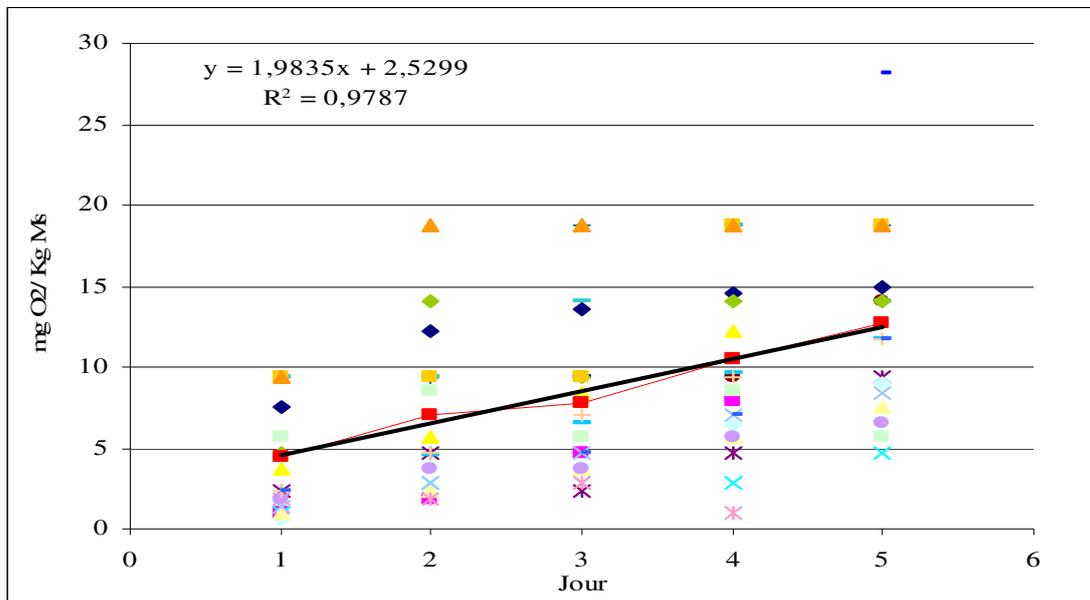


Figure 16 : Répartition des valeurs obtenues pour la DBO

La courbe de tendance, représentée en noir, est tracée par rapport à la moyenne des résultats obtenus symbolisés en rouge. Si le coefficient de détermination (R^2) de la droite de corrélation de 0,9787 est satisfaisant, par contre, la variabilité des résultats reste trop élevée, entre 10 et 20%.

e) Suivi de la dégradation d'un même lot de déchets

Le but de ces essais est de mettre au point une méthode analytique permettant d'estimer l'état de maturité du compost. Un échantillon de déchets verts est analysé tout au long de son traitement pour suivre son évolution. Un prélèvement par mois est réalisé et une série de 10 mesures est effectuée dans les conditions précédemment définies. Les courbes de consommation en O₂ sont représentées sur la Figure 17.

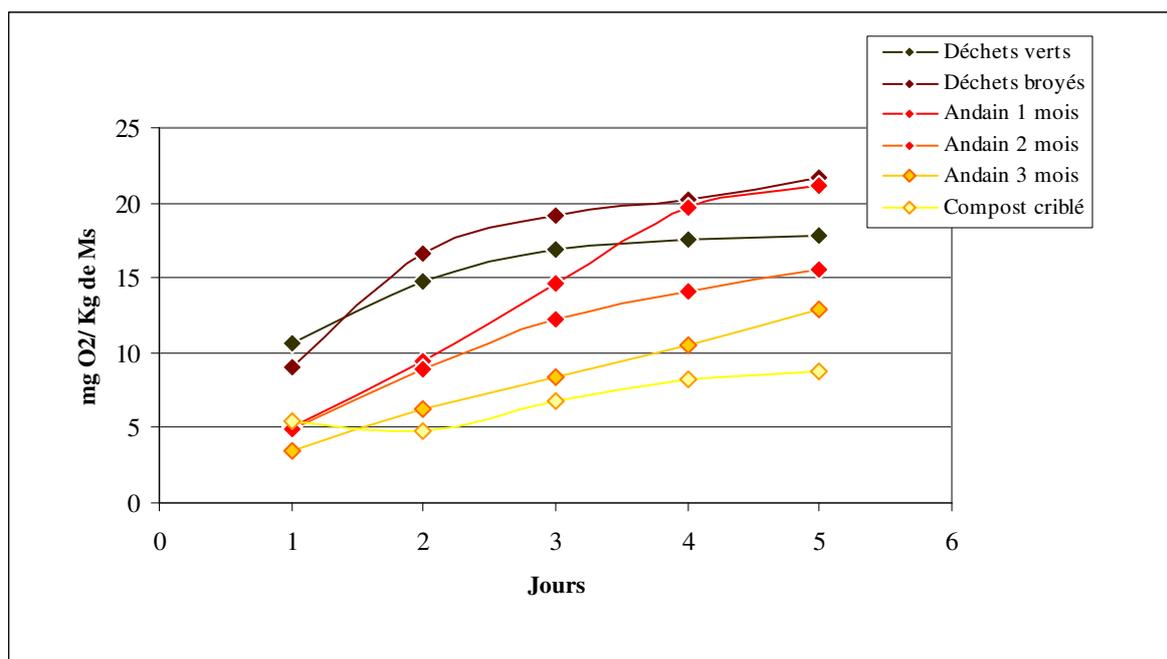


Figure 17 : Evolution de la DBO sur support solide

Les consommations en O₂ sont progressives quel que soit le stade de traitement du déchet. Cette consommation est faible pour les déchets verts. L'étape de broyage augmente considérablement l'activité des micro-organismes, puis celle-ci diminue progressivement. La pente de la courbe relative au compost criblé est la plus faible (plus faible consommation en oxygène). Cette évolution de la consommation en O₂ correspond avec les informations trouvées dans la littérature [Changa *et al.*, 2003 ; Mustin, 1987].

f) Conclusion

Le suivi de l'évolution de la consommation en O₂ permet donc de connaître l'état d'avancement dans le traitement et par voie de conséquence l'état de maturité du compost. Cependant, l'importance des erreurs sur une même mesure a montré la limite de cette méthode, mais elle reste une solution facile et simple pour une estimation de l'état de maturité d'un compost. Les inconvénients de cette méthode restent l'introduction de l'échantillon solide dans le flacon et l'ajustement de l'humidité. Pour obtenir une valeur comprise entre 45 et 55%, de nombreux essais et contrôles s'avèrent nécessaires, rendant l'opération longue. C'est pourquoi, à la suite de ces résultats encourageants, des essais sur une suspension de compost ont été réalisés.

II.3.1.2. Essai sur une suspension de compost

La préparation des échantillons est identique pour tous les essais : le compost est mis en suspension dans de l'eau, puis laissé sous agitation pendant 1 heure. Les flacons sont ensuite remplis. Le choix des conditions de réalisation de l'analyse est effectué comme précédemment grâce à des séries de mesures validant les principaux paramètres. Différentes suspensions de compost ont été testées de 0,2 à 0,8 g/L. Cette étape est menée en parallèle avec le choix du volume le mieux adapté, puisque ces deux paramètres sont liés. Les volumes testés sont ceux préconisés par le constructeur des Oxytop® et sont détaillés dans le Tableau 33.

Tableau 33 : Facteur de dilution appliqué pour la mesure de la DBO avec des Oxytop®

<i>Volume introduit</i>	<i>Volume d'air correspondant</i>	<i>Facteur de dilution</i>
432	68	1
365	135	2
250	250	5
164	336	10
96	404	20

La première remarque concerne les plus faibles volumes introduits, les valeurs lues oscillent entre 0 et 10 mg O₂/L, auxquelles il faut appliquer les facteurs de dilution entre 5 et 20 indiquant donc une imprécision sur les mesures trop élevées pour l'étendue de la gamme de mesure. A contrario, le volume maximum introduit est de 432 mL, mais il est trop élevé par rapport au volume d'oxygène restant dans le flacon. Le système risque alors de passer en anaérobiose pendant les 5 jours de la durée de l'analyse. La concentration retenue est donc de **0,5 g/L** pour un volume de **365 mL**. L'évaluation de la consommation en O₂ par le biais de cette méthode est représentée dans la Figure 18.

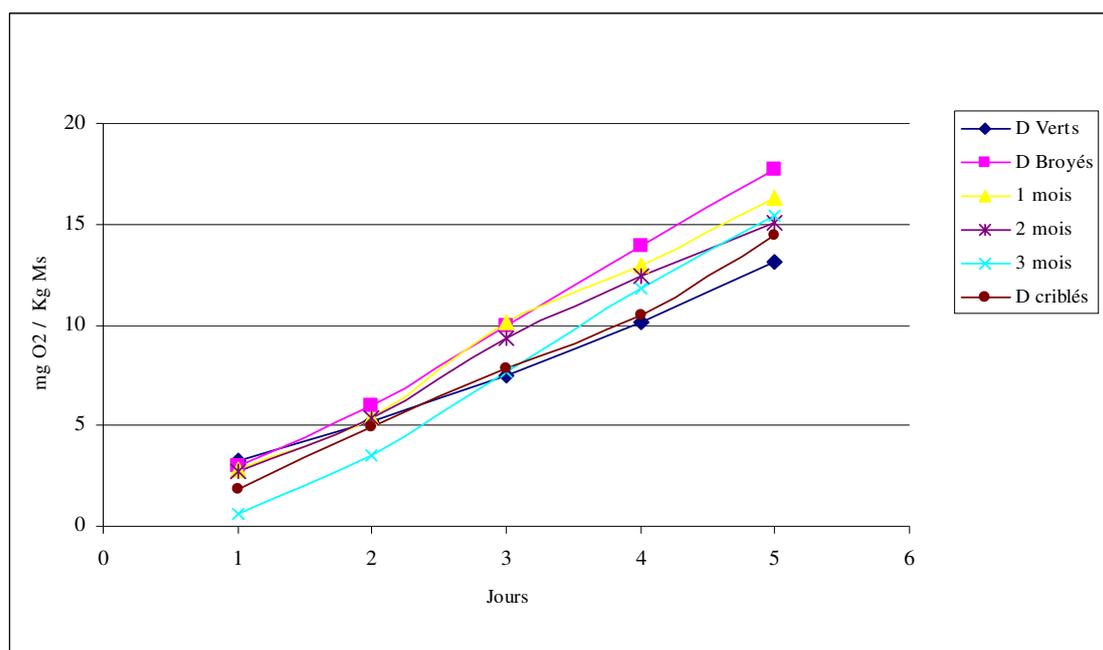


Figure 18 : Evolution de la DBO du compost en milieu liquide

Les pentes des courbes vérifient que plus le processus de compostage évolue, moins l'activité est importante. Cette évolution est similaire avec les résultats obtenus sur compost frais. Ramenées à la matière sèche par le calcul, les consommations d' O_2 sont plus faibles d'un facteur 2, provenant des conditions du mode opératoire. Il est probable que les micro-organismes soient moins présents ou moins actifs en solution liquide, puisque leur milieu de développement est différent.

La variation des écarts types calculés est proche de 10% comme pour les essais sur compost solide, mais le liquide est un milieu plus homogène. Cependant les micro-organismes se développent préférentiellement sur un support solide, dans un souci de représentativité, les particules grossières sont séparées de la solution avant l'analyse.

La méthode manométrique de la DBO peut être employée pour estimer la consommation en O_2 d'un échantillon. Le compost frais ou mis en solution peut être indifféremment utilisé en fonction du matériel de laboratoire disponible. Ces deux méthodes posent chacune le problème de la représentativité de l'échantillon, les quantités prélevées étant soit difficiles à introduire dans le flacon soit trop faibles en milieu liquide.

II.3.1.3. Essai sur suspension de compost de déchets ménagers

L'adaptation des conditions de réalisation de cette analyse a permis d'élaborer une gamme de référence pour estimer rapidement l'état de dégradation des déchets verts. Des prélèvements sont réalisés fréquemment sur l'usine A afin de continuer la validation la méthodologie. Des tests de validation sur des déchets urbains sont effectués lors de la phase d'application de la méthodologie sur

l'usine B. La méthode retenue est en milieu liquide avec une suspension d'échantillon à 5 g/L, dans les conditions prédéfinies. Le procédé de compostage des déchets urbains étant différent de celui des déchets verts, seule la phase de fermentation est prise en compte dans cette étude. Des prélèvements sont donc effectués tous les 5 jours, puisque le procédé de fermentation de l'usine B dure 21 jours et les résultats sont représentés sur la Figure 19.

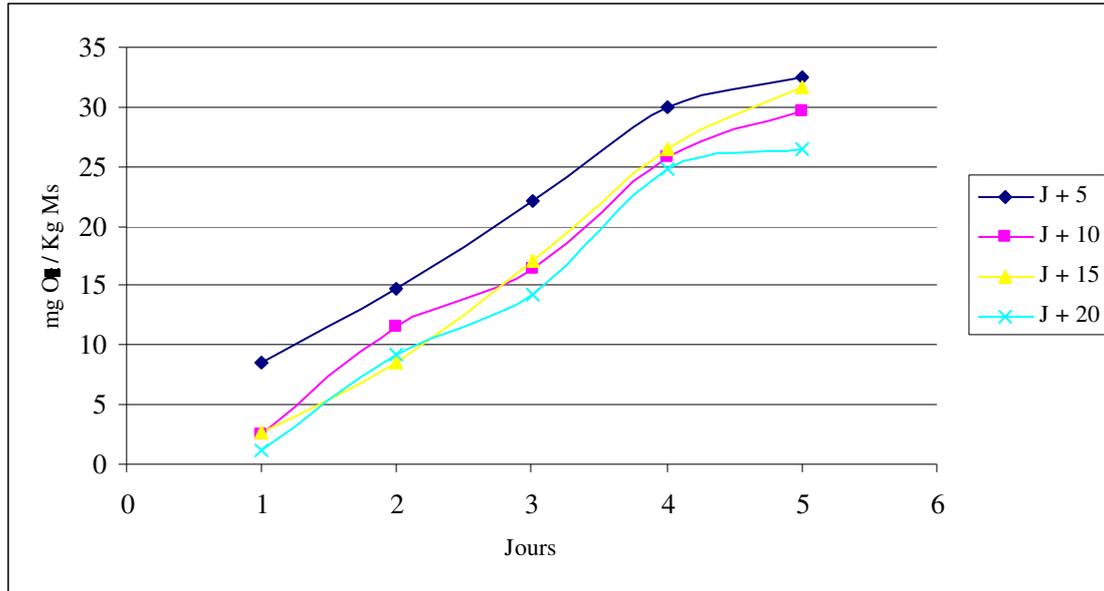


Figure 19 : Suivi de la DBO sur un échantillon de déchets urbains en cours de fermentation

L'allure des courbes de consommation en O₂ est similaire à celles obtenues avec des déchets verts, elle augmente progressivement pendant les 5 jours de l'analyse. Cependant, la consommation en O₂ est beaucoup plus active au début de la fermentation. N'ayant pas de point de référence sur le jour 0, correspondant à la mise en andain, on peut supposer que l'activité des micro-organismes est amorcée avant la mise en fermentation, qui est donc très active en début de cycle.

Le coefficient directeur des droites des déchets ménagers est plus élevé que celui des déchets verts, les micro-organismes sont donc plus actifs que dans le cas des déchets verts. Cette activité des micro-organismes est due à une fermentation plus active des déchets urbains du fait de leur hétérogénéité et de la nature des déchets fermentescibles.

II.3.1.4. Conclusion

Le suivi de la consommation en O₂ permet d'estimer la maturité du compost, mais l'erreur sur la mesure de 10% implique la réalisation de plusieurs répétas pour obtenir une valeur représentative. Les résultats sont similaires sur compost solide comme en milieu liquide, sachant qu'une solution est homogène et donc plus facile à introduire dans le flacon. Cependant, des travaux complémentaires seront nécessaires pour valider ces résultats sur d'autres échantillons des déchets ménagers et de

déchets verts. L'avancement actuel de ces travaux montre une relation entre la consommation en O_2 et l'état de la maturité du compost, toutefois aucune relation entre les différents types de déchets n'a été mise en évidence. A terme, une grille de l'état de maturité en fonction de la consommation en O_2 et en fonction de la nature du substrat sera élaborée.

II.3.2. Comparaison avec des méthodes d'évaluation de la production de CO_2

D'autres méthodes analytiques de laboratoire plus fiables sont réalisées à titre de comparaison pour s'assurer de la validité de la mesure de la consommation en O_2 par la méthode manométrique. Ces analyses mesurent le dégagement en CO_2 et sont réalisées en parallèle pour comparer les résultats d'un même échantillon de déchets verts au cours de sa fermentation. Le suivi de la production de CO_2 , va donc d'une part confirmer cette fermentation grâce à l'analyseur de gaz, qui mesure trois gaz, et d'autre part conforter les résultats obtenus pour la consommation en O_2 , sachant que seule la consommation d' O_2 est un facteur fiable pour estimer l'avancement et l'évolution d'un compost (Mustin, 1987).

Les volumes et les masses sont modifiés afin de conserver des conditions expérimentales similaires à la méthode testée auparavant, en enceinte close, pendant 5 jours à une température de $21^\circ C$ à l'obscurité avec agitation. Le rapport volume de liquide sur volume d'air est de 1,27 comme dans les flacons de la méthode manométrique.

Les résultats de **l'analyseur de gaz** permettent de suivre simultanément la production de CO_2 et la consommation d' O_2 . Le méthane, étant en très faible quantité (inférieure à $0,5 \text{ mg CH}_4/\text{Kg Ms}$), n'apparaît pas sur les courbes de résultats. Le suivi est réalisé pendant 4 jours. Un exemple de résultat est représenté Figure 20 et montrent, bien que les pentes des courbes soient différentes, que la fermentation aérobie est majoritaire puisqu'il y a corrélation entre la quantité de CO_2 produite et celle d' O_2 consommée.

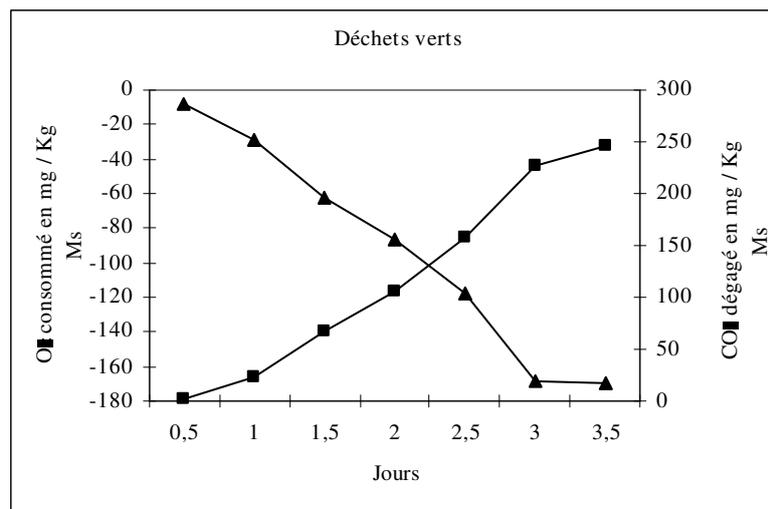


Figure 20 : Evolution de la consommation d'O₂(▲) et de la production de CO₂(■) avec l'analyseur de gaz

Après calcul et expression des résultats en mmol/Kg Ms, un léger excès en CO₂, est remarqué dont une partie est attribuable à une faible fermentation anaérobie d'environ 3%, le reste provient de l'imprécision de la mesure.

II.3.3. Comparaison des tests de maturité

La comparaison des performances de la méthode manométrique et d'autres méthodes respirométriques a permis de valider les résultats sur un échantillon de compost solide ou de compost mis en solution avec de l'eau. Une deuxième étape consiste alors à s'assurer de la concordance des résultats avec d'autres tests de maturité. Pour cela, parallèlement aux essais manométriques sur des déchets verts, des analyses en vase Dewar sont effectuées afin de contrôler les montées en température et déterminer un indice de maturité, parallèlement à des tests colorimétriques de type Solvita®.

Les résultats des tests de montée en température par la méthode **Dewar** ne sont pas concluants. En effet, les échantillons prélevés à différentes étapes du procédé de dégradation conservent une montée en température similaire et l'indice de maturité exprimé par ce test est IV. Les conditions expérimentales de la mise en œuvre du procédé ont été rectifiées (variation de l'humidité, de la granulométrie de l'échantillon, du temps d'incubation) comme le décrivent les différents auteurs qui ont étudié et comparé cette méthode avec d'autres indicateurs de maturité [Boulala, 2005, W.R.A.P, 2005 ; Francou, 2003,].

Par contre, les tests réalisés avec la **méthode colorimétriques** de type Solvita® montrent une progression de la fermentation. Les résultats de la méthode manométrique sont comparés avec ceux

obtenus par cette méthode colorimétrique concernant les déchets verts du site A et présentés dans le Tableau 34.

Tableau 34 : Comparaison des tests de maturité

	<i>mg O₂/Kg Ms après 5 jours</i>	<i>Indicateur Solvita®</i>
Déchets verts	18	3
Déchets criblés	22	3
1 mois	21	4
2 mois	16	5
3 mois	13	6
Compost	9	7

Les déchets verts passent de la qualification « en cours de dégradation » à celle de « mûr » pour le compost comme indiqué dans le Tableau 35.

Tableau 35 : Comparaison des différentes méthodes d'évaluation de la maturité [Wallace, 2005 ; Rytz, 2001 ; W.E.R.L, 2000]

<i>Stade de dégradation du compost</i>		<i>O₂ (mg/g MV/j)</i>	<i>CO₂ (mg/g MV/j)</i>	<i>Dewar</i>	<i>Solvita®</i>
Compost très mature, inactif, pas de limitation pour son utilisation	Compost Mature	<3	1		8
Compost mature, peu de limitation à son utilisation		5	2	V	7
Compost avec faible besoin de maintenance et de surveillance	Compost en cours de dégradation	11	4		6
Compost avec une activité modérée, besoin d'une surveillance		16	6	IV	4
Compost actif, besoin intense de surveillance et de suivi		21	8	III	5
Matériau frais, très actif avec un fort besoin d'aération et/ou de retournement	Compost en début de dégradation	27	10	II	3
Matériaux bruts, avec un fort taux de décomposition, matière putrescible ou très odorante		32	12		3
		>40	>15	I	1

M.V : matière volatile

Dans une étude de Changa *et al.* (2003), les tests colorimétriques de type Solvita® sont comparés à plusieurs paramètres dont l'évolution du CO₂ pour différents type de déchets. Une relation est notée entre ces deux méthodes puisqu'elles détectent le CO₂ dégagé, mais la méthode de terrain est préconisée car elle fournit des informations sur le dégagement de NH₃ et est plus simple de mise en œuvre.

II.3.4. Conclusion sur la méthode respirométrique DBO

Différents essais d'évaluation de la DBO sur des déchets verts frais ou en milieu liquide ont confirmé un lien avec d'autres méthodes analytiques notamment le dégagement de CO₂. Les résultats obtenus grâce à la méthode manométrique permettent de prédire l'état de maturité des déchets verts du site A. Pour autant des essais avec des échantillons d'autres sites de compostage de déchets verts permettraient de confirmer cette tendance et de valider totalement la méthode. La même démarche reste à effectuer sur des usines de compostage d'ordures ménagères. A terme, une grille de maturité du compost pourra être évaluée en fonction de l'activité des micro-organismes. Pour exemple, une présentation préliminaire est proposée Figure 21 avec les résultats obtenus pour l'usine de déchets verts du site A, dans les conditions expérimentales définies. La moyenne des essais effectuée avec les déchets verts à différents stades du procédé permet de tracer les limites de la zone de maturité et de celle de non maturité en tenant compte de la précision de la méthode.

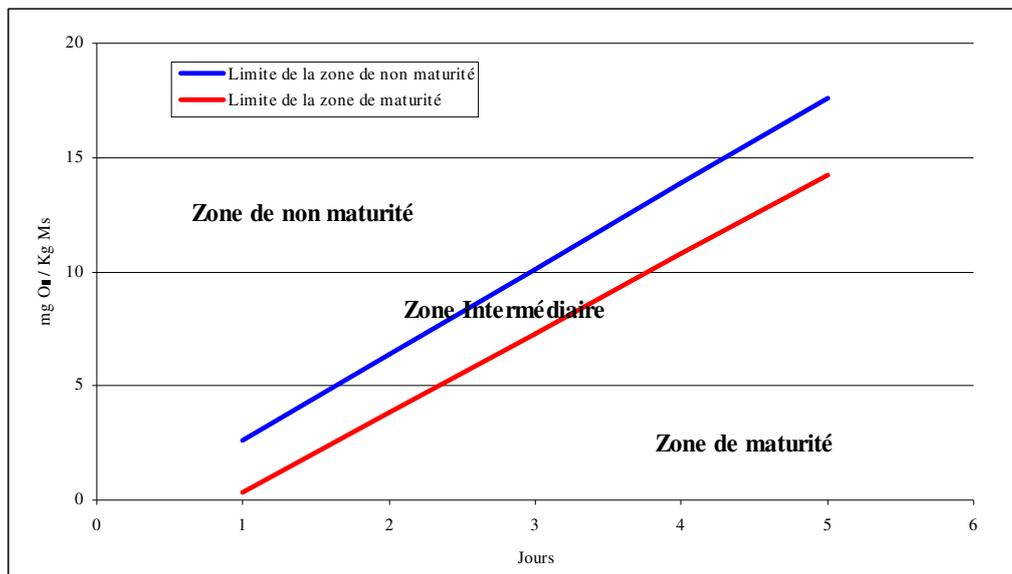


Figure 21 : Estimation de la maturité dans un graphique représentant l'O₂ consommée d'évaluation de la maturité des déchets verts par Oxitop®

La mise en œuvre consiste à réaliser le test de la DBO pendant 5 jours et de comparer le positionnement des valeurs par rapport à la grille d'évaluation. Les études réalisées montrent que la méthode manométrique alternative peut être employée pour obtenir une **estimation** de la maturité.

Chapitre 2 : Validation sur le site A

Dans une démarche logique d'élaboration d'une méthodologie, des étapes de validation sont nécessaires pour s'assurer de son adéquation avec les objectifs visés. Une première validation de cette méthodologie a été entreprise sur l'usine de compostage de déchets verts du site A. Ce type de compostage correspond à un concept plus simple que celui du compostage des déchets urbains et les paramètres perturbateurs du procédé y sont plus restreints. Même si le procédé du site A est relativement bien maîtrisé, cet essai d'expertise permettra de valider les premières étapes de la méthodologie, à savoir la prise de contact, les questionnaires, l'élaboration du cahier d'analyse et de recommandations. L'expertise s'est déroulée en avril 2002 en suivant la démarche proposée dans le chapitre 1.

I. Suivi et contrôle du procédé

Après plusieurs contacts téléphoniques et des visites sur le site, les deux **questionnaires** ont été fournis à l'exploitant. Leurs retours complétés, ont permis de mieux appréhender le procédé et d'adapter la méthodologie à ses étapes. L'étude prend en compte plusieurs volets : le suivi et le contrôle du procédé, l'impact du fonctionnement de l'usine sur l'écosystème, l'analyse et la répartition des coûts d'exploitation. La plate-forme de compostage est située sur le centre de tri des emballages ménagers de la ville du site C, son procédé est schématisé sur la Figure 22.

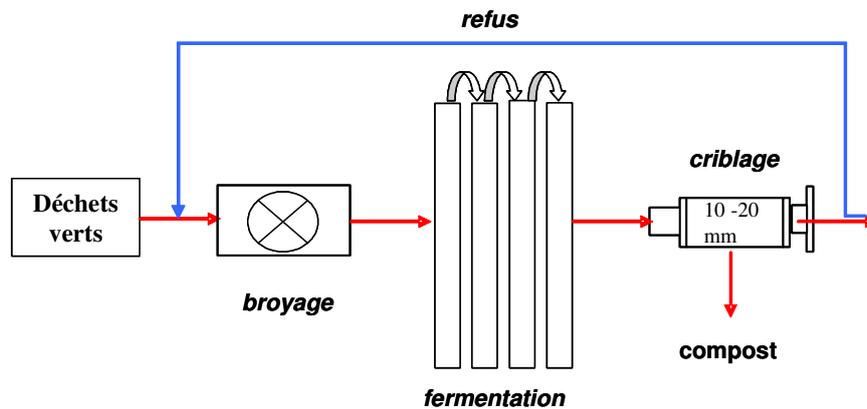


Figure 22 : Schéma du procédé de compostage de déchets verts du site A

I.1. Historique

Depuis 2000 le bilan de production a pu être établi, grâce au tonnage des déchets entrants connu par la pesée des camions de livraison et au tonnage des refus de criblage. La différence donne la quantité de compost. Un bilan annuel est estimé, dans le Tableau 36, pour les deux années précédant l'expertise.

Tableau 36 : Bilan matière annuel

	2000	2001
<i>Entrée déchets verts (T)</i>	5 754	7 500
<i>Production de compost expédiée (T)</i>	400	2 550

La perte de matière se situe vers 93% la première année (production débutant en septembre), puis elle devient conforme à la littérature avec 66% en 2001. La première année de fonctionnement est toujours une année transitoire, durant laquelle le procédé n'est pas entièrement maîtrisé.

I.2. Suivi du procédé

L'exploitant réalise uniquement un suivi mensuel de la température, regroupant une moyenne de 6 mesures à des profondeurs et à des points différents, de l'humidité grâce à une thermo-balance. Lors de l'expertise des mesures régulières des principaux paramètres sont effectuées (H%, MO% et C/N) selon les protocoles énoncés dans la partie II, sur des échantillons de déchets prélevés à chaque étape. Les résultats des analyses des échantillons prélevés sur le site A sont présentés dans la Figure 23.

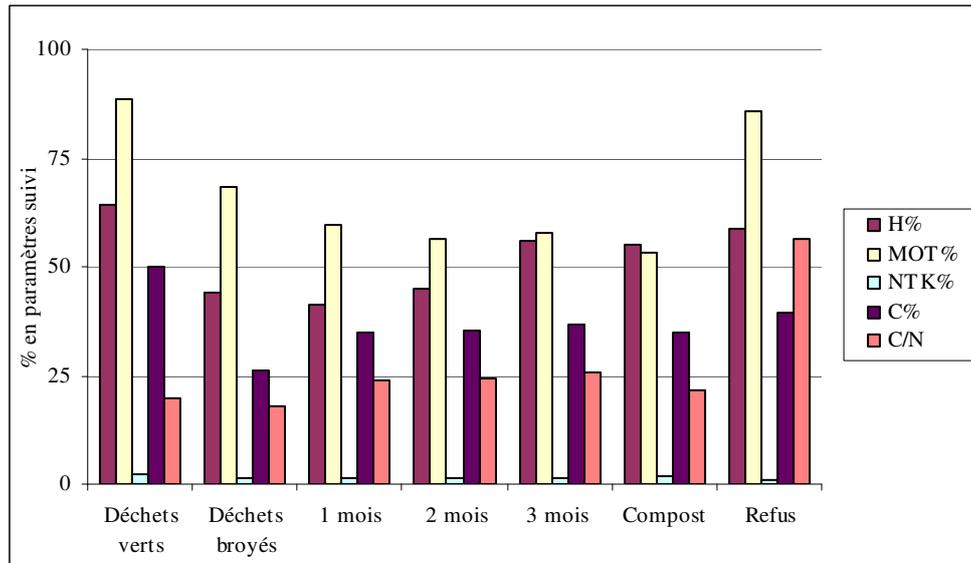


Figure 23 : Suivi des paramètres globaux du compostage

Les relevés de **température** indiquent une variation entre 60°C et 80°C au cours du procédé, l'hygiénisation semble suffisante. La **teneur en eau** au début du procédé se situe autour de 40% alors qu'à la fin elle est de 60%. L'évolution de ce paramètre est contraire au besoin en eau des micro-organismes. Une teneur plus importante de l'ordre de 50 à 80% est requise en début de fermentation afin de dynamiser la dégradation [Liang, 2003 ; Richard *et al.*, 2002]. Les contrôles de ces deux paramètres sont mensuels et s'effectuent au cours de la phase de retournement ; il serait judicieux d'augmenter ces fréquences à quinze jours d'intervalle, afin de prévenir une diminution du taux d'humidité de l'andain et d'intervenir le plus tôt possible.

La teneur en **M.O.T** des déchets verts est proche de 90%, chiffre comparable aux valeurs données dans la littérature supérieure à 90% pour des résidus d'élagage [Mustin, 1987], puis diminue progressivement au cours du procédé pour atteindre 53% dans le compost. La diminution relative de la M.O, rapport entre la masse de matière organique perdue et la masse de matière organique initiale est de 41%, valeur comprise dans la gamme de 20 à 60% donnée par la littérature [Atkinson *et al.*, 1996 ; Canet & Pomares, 1995 ; Iannotti *et al.*, 1994]. La teneur en M.O.T% se stabilise ensuite lors de la

fermentation. Par contre, la quantité de matière organique retrouvée dans les refus de criblage est élevée 86%, ce qui explique la réintroduction de ces refus en tête du procédé.

Le **rapport C/N** des déchets verts est insuffisant car proche de 20 alors que la littérature donne une valeur comprise entre 25 et 40 pour des déchets verts [Antizar-Ladislao *et al.*, 2005, Sadaka & El Taweel, 2003]. Cependant, la valeur de ce rapport est ajustée par l'introduction du refus de criblage ayant un rapport C/N proche de 65. Etant donné la proportion de déchets verts nettement supérieure à celle des refus, le rapport C/N du mélange mis en andain est augmentée, à une valeur de 27 pour les déchets broyés.

Une **étude granulométrique** a également été menée pour vérifier l'efficacité des équipements. Les résultats sont présentés dans la Figure 24. Les dimensions des mailles sont choisies en fonction du procédé : 50 mm en accord avec les performances du broyeur, puis 20 ou 10 mm selon les dimensions des mailles du crible et de la granulométrie du compost produit.

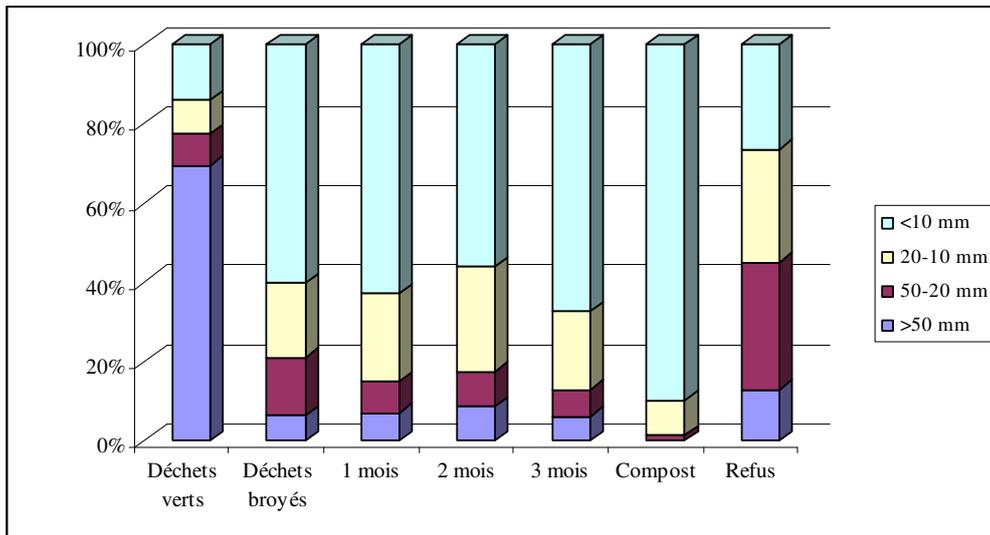


Figure 24 : Evolution de la granulométrie

Les déchets verts sont composés à 65% de particules supérieures à 50 mm. Le broyage réduit considérablement cette fraction granulométrique, le pourcentage de particules inférieures à 10 mm en est augmenté. L'augmentation de la fraction granulométrique 20-10 mm à 2 mois provient d'une erreur de mesure ou d'une erreur d'échantillonnage. Plus de 50% de particules inférieures à 20 mm se retrouvent dans le refus de criblage. Cette grande perte de fines particules diminue le rendement du procédé et met en exergue le dysfonctionnement du crible.

I.3. Qualité du compost

Une analyse complète de la qualité du compost (H%, C/N, Conductivité, MO%, NH_4^+ , P_2O_5 , CaO, MgO, K_2O) est réalisée mensuellement, conformément à la norme française NF U 44-051, et présentée dans le Tableau 37.

Tableau 37 : Résultats analytiques moyen de la qualité du compost

	Unités	Ecolabel	Moyenne 2000-2001
MS%	%	> 25	41,3
C/N	/	/	17,7
Conductivité	mS/cm	/	1,8
MOT%	%	/	21,9
MO/NTK	/	/	31,7
NH_4^+	%	/	0,02
P_2O_5	%	/	0,3
CaO	%	/	1,1
MgO	%	/	0,3
K_2O	%	/	0,6
Al	mg/Kg	/	0
As	mg/Kg	< 7	3,5
Cd	mg/Kg	< 1,5	0,3
Cr	mg/Kg	< 140	19,3
Cu	mg/Kg	< 75	17
Hg	mg/Kg	< 1	0,15
Mo	mg/Kg	< 2	1,1
Ni	mg/Kg	< 50	7,5
Pb	mg/Kg	< 140	15,4
Se	mg/Kg	< 1,5	1
Zn	mg/Kg	< 300	67,2

Au vu des résultats de ces analyses, $\text{C/N}_{\text{moyen}} = 17,65$ et $\text{NH}_4^+ = 0,02\%$, le compost semble mature. Toutefois, le rapport C/N varie de 9,5 jusqu'à 33 d'un mois sur l'autre. Le résultat de l'analyse du C/N effectué dans le cadre de l'étude montre un C/N voisin de 21 (Cf. Figure 23), ce qui est un peu élevé. Il faut noter que le compost analysé correspond à une durée de fermentation de 3 mois, comme les flux de déchets entrants ont augmenté, l'usine est saturée et la durée du procédé a été réduite de 4 à 3 mois. Des analyses plus complètes sont effectuées tous les 6 mois intégrant la mesure de certains métaux lourds, dont les résultats sont également en accord avec la réglementation comme le montre le Tableau 37.

I.4. Débouchés du compost produit

Une politique de communication et de sensibilisation auprès des riverains comme des utilisateurs de compost est essentielle pour l'écoulement du produit. A l'origine, cette sensibilisation a été établie auprès des riverains afin qu'ils comprennent la nécessité et le caractère non polluant de l'activité. Elle s'est poursuivie auprès des services des espaces verts et des professionnels pour faire connaître le produit et les persuader de l'utiliser plutôt que des fertilisants chimiques. Enfin, une commission

locale d'informations permet chaque année aux particuliers et associations d'obtenir de plus amples renseignements sur les conditions d'exploitation, de comprendre les activités du centre de recyclage et l'intérêt du compostage.

Une nouvelle opération de promotion est mise en œuvre consistant à ensacher le compost afin que les particuliers puissent récupérer, en échange de leurs apports volontaires de déchets verts, du compost sous forme de sacs de 40 L dans les trois déchetteries de la ville du site A.

Les contrôles de qualité du compost sont réalisés régulièrement, montrant sa conformité avec la réglementation en vigueur et aux normes. Cependant, des tests de toxicité en grandeur nature devraient être réalisés afin de connaître l'impact du compost sur les sols agricoles et les rendements de cultures. Ces tests se mettent en place en partenariat avec la chambre d'agriculture, et se dérouleront sur une période de quatre ans. Ils sont très importants pour l'image du compost.

II. Impacts environnementaux

Les impacts sur le sol et le sous-sol comme sur les eaux souterraines ont pour origine les **lixiviats** ou les eaux de ruissellement comme les eaux d'infiltration drainées par le parking et les toitures. Sur le site A toutes les eaux rejetées sont canalisées dans un système séparatif, limitant les impacts sur l'environnement. Les normes de rejets des eaux sont fixées par arrêté préfectoral d'exploitation, dont les valeurs sont fournies dans le Tableau 38.

Tableau 38 : Composition des rejets liquides

	<i>Norme de rejet dans le réseau d'assainissement</i>	<i>Lixiviats</i>	<i>Eaux pluviales</i>	<i>Norme de rejet dans le milieu naturel</i>
<i>pH</i>	5,5-8,5	8,40	7,75	5,5-8,5
<i>T°</i>	<30	12,6	11	<30
<i>MES (mg/L)</i>	600	902	5	100 + flux 20 Kg/j
<i>DCO (mg O₂/L)</i>	2 000	3565	24	300 + flux 60 Kg/j
<i>DBO₅ (mg O₂/L)</i>	800	460	3	100 + flux 20 Kg/j
<i>HC (mg/L)</i>	10	<0,010	18,55	10

HC : hydrocarbure

La composition des lixiviats doit être conforme aux normes de rejet dans le réseau d'assainissement et les eaux pluviales aux normes de rejet dans le milieu naturel. Les résultats montrent un dépassement ponctuel des concentrations en D.C.O et M.E.S, sans que le flux de matières polluantes n'ait dépassé le seuil fixé par l'arrêté d'exploitation. Il est impossible de quantifier les débits de rejets, faute de débitmètres placés en sortie des bassins de rétention. Toutefois, il est certain que le débit de rejet des

eaux pluviales dans le milieu naturel n'excède pas la limite inférieure de 20 Kg/j en conditions climatiques normales.

Les **dégagements gazeux** possibles en dehors du gaz carbonique et de la vapeur d'eau produits lors du compostage sont des mercaptans (RHS), de l'ammoniaque (NH₃), du méthane (CH₄) et de l'hydrogène sulfuré (H₂S). Ces dégagements proviennent d'une mauvaise aération des andains conduisant à des fermentations anaérobies. Ces teneurs en gaz doivent respecter l'arrêté préfectoral d'exploitation, qui préconise un contrôle des dégagements gazeux une fois par semaine. Or les analyses de gaz sont réalisées mensuellement lors des retournements, le plus proche possible des habitations, afin de quantifier au mieux, la nuisance. Les résultats sont stables, toujours inférieurs à 0,2 mg/m³ et ne dépassent pas ceux fixés par l'arrêté préfectoral d'exploitation (H₂S, NH₃, RHS respectivement 0,3, 0,2, 1,0 mg/m³).

Aucune mesure d'évaluation de l'impact du fonctionnement sur **les écosystèmes** n'a été réalisée. Une campagne de mesures **sonores**, effectuée en 2000, est intégrée dans l'étude. Le bruit constitue une gêne pour les riverains comme pour les agents. Cette campagne comporte trois points de mesure sur la plate-forme, la première au niveau du broyeur, la seconde au niveau du retournement et la dernière à l'extérieur du site pour évaluer l'ambiance sonore. Les résultats ne présentent pas de dépassement par rapport à la législation française en vigueur (code du travail article R 232-8-1).

III. Répartition des coûts d'exploitation

Une analyse des coûts d'exploitation de l'usine de compostage ne peut être réalisée séparément de celle du centre de tri. En effet, certains frais sont communs aux deux activités et difficilement séparables. Cependant, une répartition des coûts à chaque étape est évaluée sur la Figure 25, en tenant compte de la masse salariale, de la consommation d'énergie, de l'investissement et du temps de fonctionnement de chaque équipement. Deux étapes supplémentaires sont incluses dans cette évaluation : l'étape de chargement du broyeur ou du cribleur et le suivi analytique du compost. Ce dernier englobe les analyses réalisées sur place, et également celles envoyées à un laboratoire extérieur. La phase de maturation n'intervient pas dans la répartition des coûts, puisqu'elle consiste au stockage des déchets sans aucun traitement.

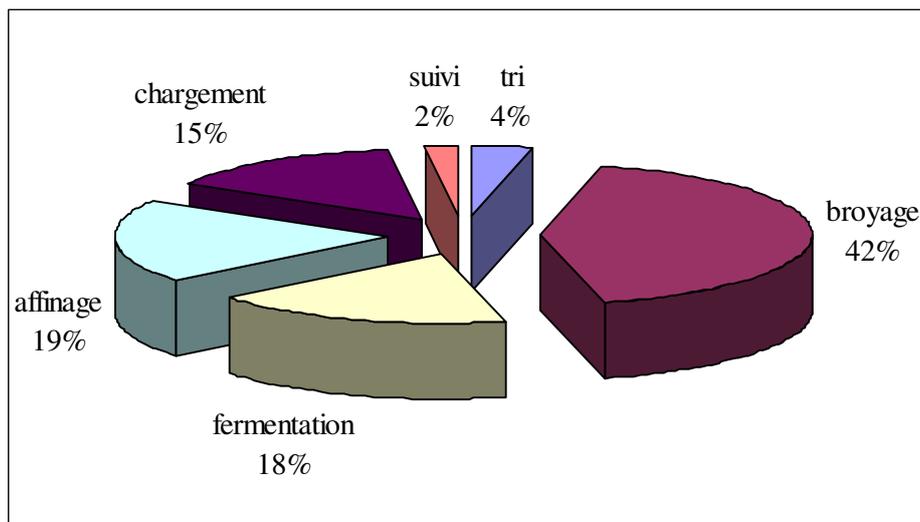


Figure 25 : Répartition des coûts d'exploitation

Les étapes utilisant des équipements mécaniques apparaissent comme les plus coûteuses, du fait des investissements initiaux et des dépenses liées au fonctionnement. Le broyage est le poste le plus onéreux 42% des coûts. L'entretien du broyeur est la dépense la plus importante relevée sur une année, en relation avec la fréquence de remplacement des marteaux. L'opération de chargement est un poste également coûteux non négligeable dans le budget puisqu'il représente 15% des dépenses. Le coût de production du compost, dépend de la totalité des dépenses et du tonnage de compost produit. Il est évalué entre 30 et 35 €/T, alors que son prix de vente pour les entreprises fluctue en fonction du tonnage de compost acheté sur l'année et de sa qualité granulométrique entre 20 et 30 €/T. Il est à disposition gratuite pour les particuliers. Ce déficit entre le prix de revient et de vente provient d'une volonté de la municipalité qui gère cette plateforme de ne pas faire payer les particuliers et d'utiliser la taxe d'enlèvement des déchets ménagers de la population.

IV. Exploitations et mesures correctives

La méthodologie mise au point concerne les déchets urbains dans les P.E.D. Sa transposition aux déchets verts a été possible, puisque elle se veut **adaptable**. De plus, son application aux déchets verts fait intervenir moins de paramètres limitants que le cas des déchets urbains. L'étude s'est déroulée sur **une journée**, complétée par des visites supplémentaires, afin d'analyser toutes les étapes du procédé et de regrouper les différents documents à consulter. L'usine étant très régulièrement suivie, seules quelques analyses complémentaires ont été effectuées comme le rapport C/N, l'humidité, la matière organique ou la granulométrie. Cette expertise a permis d'apprécier la méthode, de rectifier les questionnaires et tous les supports d'expertise.

IV.1. Questionnaires

La logique de la prise de contact n'a pu être validée pour ce site, en effet des relations de confiance étant déjà établies entre l'équipe de production de l'usine et l'équipe de recherche, l'accord pour la réalisation de l'expertise a été facilement obtenu. Toutefois, les deux questionnaires d'évaluation ont été fournis à l'exploitant. Leurs retours dûment complétés, et les impressions de l'équipe de production ont permis de les réajuster.

Quelques questions ont été reformulées suite à des remarques d'incompréhension ou suscitant des éclaircissements par l'exploitant. Le questionnaire sur le contexte de l'implantation a été jugé peu adapté à la situation de l'usine par l'exploitant car beaucoup de questions restent sans réponse. Pour autant, il semble correspondre au cas des usines des P.E.D. Concernant le questionnaire sur le procédé, les questions liées aux coûts (à chaque étape ou frais analytiques) n'ont pas été renseignées ou seulement de façon imprécise, non pas à cause d'une mauvaise volonté de l'exploitant, mais par un manque réel d'information. Ceci a conforté l'importance de recueillir ces données dans les usines des villes des P.E.D, avec une gestion moins précise et moins suivie que celle des usines des P.I.

Les informations obtenues grâce aux questionnaires permettent de mieux comprendre le fonctionnement de l'usine, et ainsi de moduler le protocole de la méthodologie en fonction des étapes du procédé. Les questionnaires ont alors fait apparaître deux défauts essentiels : un manque de données dans les étapes intermédiaires du procédé et une absence des coûts qui leurs sont liés. Un exemple des questionnaires complétés est présenté en annexe 1, il se rapporte à une usine dans les P.E.D.

IV.2. Supports d'expertise

Les différents supports élaborés sous forme de synoptique ne permettent pas de répondre à la somme d'informations fournies par le personnel lors des entretiens. En effet, la réponse à une question donnée amène bien souvent à élargir celle-ci sur d'autres points. Le support doit être synthétique, simple d'utilisation et permettre une prise de note de plusieurs critères simultanément. Ces supports ont été rectifiés sous forme de tableaux, regroupant les différentes étapes du procédé, ils sont présentés dans le Tableau 39. Les résultats analytiques ont été supprimés de ces documents, car ils feront l'objet d'une étude spécifique. Cela permet d'alléger les documents de synthèse.

Tableau 39 : Support d'expertise modifié

Critères	Positif	Moyen	Négatif	Justificatifs	Personnes consultées	Commentaires
USINE dimension usine dimension plateforme lieu d'implantation nombre d'employé						
IDENTIFICATION des ENTRANTS Déchets électricité carburant eau						
IDENTIFICATION des SORTANTS Compost refus de tri refus de criblage lixiviats						
PROCEDE TRI équipement couts carburants temps de travail refus						

Le tableau comprend : une première colonne avec les critères à évaluer, classés en fonction des étapes du procédé. La deuxième colonne fournit une première approche de leur évaluation succincte et visuelle, une croix est à placer dans une des trois colonnes : positif, négatif ou moyen. Par exemple le premier critère évalue les dimensions de l'usine. Une colonne est réservée à l'identification des personnes consultées. Une grande partie du support est laissée aux commentaires pour une prise de note simplifiée. Seuls des mots clés sont inscrits, pour limiter les oublis, tout en laissant un maximum de liberté pour les réponses du personnel.

IV.3. Rassemblement des informations et fiabilité

Bien que l'usine soit régulièrement suivie et l'exploitant très disponible, le recensement des documents a été difficile. Une liste des documents à consulter a été établie pour faciliter la recherche dans les archives de l'usine. De même, la justesse et la fiabilité de ces documents doivent être évaluées et prises en compte lors de l'analyse du site. En effet, chaque personne interrogée possède sa propre opinion et les différents témoignages doivent être croisés dans un souci d'objectivité.

IV.4. Réalisation des analyses

Des incohérences sont apparues lors de l'exploitation des résultats. En effet, l'étude effectuée sur une journée ne reflète pas le fonctionnement d'un andain mais son **image** à un instant précis. Il est donc impossible d'obtenir le suivi réel des paramètres puisque la nature des déchets entrants varie

chaque mois. Pour ce faire, un suivi complet de certains andains a été mené sur une période de 7 mois, d'octobre 2002 à mai 2003. Trois andains complets ont ainsi été suivis. Cette nouvelle étude prend en compte les défaillances révélées précédemment et introduit de nouveaux paramètres analytiques comme le pH, la densité et la pluviométrie. Le suivi de l'usine est réalisé chaque semaine.

Les variations de **pH** ont une allure en accord avec celle rencontrée dans la littérature [Damien, 2004]. A partir d'un pH initial aux alentours de 6, il augmente jusqu'à des valeurs sensiblement proches de la neutralité. Le pH final est cependant un peu trop élevé entre 8 et 8,5, il devrait se situer vers 7. L'évolution du pH peut être directement reliée avec l'allure du suivi de la température comme l'indique la Figure 26. Les retournements de l'andain provoquent des chutes brutales de température très marquées pour l'andain 2 et simultanément une augmentation de l'acidité du milieu. Cela provient sans doute d'un développement de micro-organismes mésophiles pouvant induire une diminution du pH des andains.

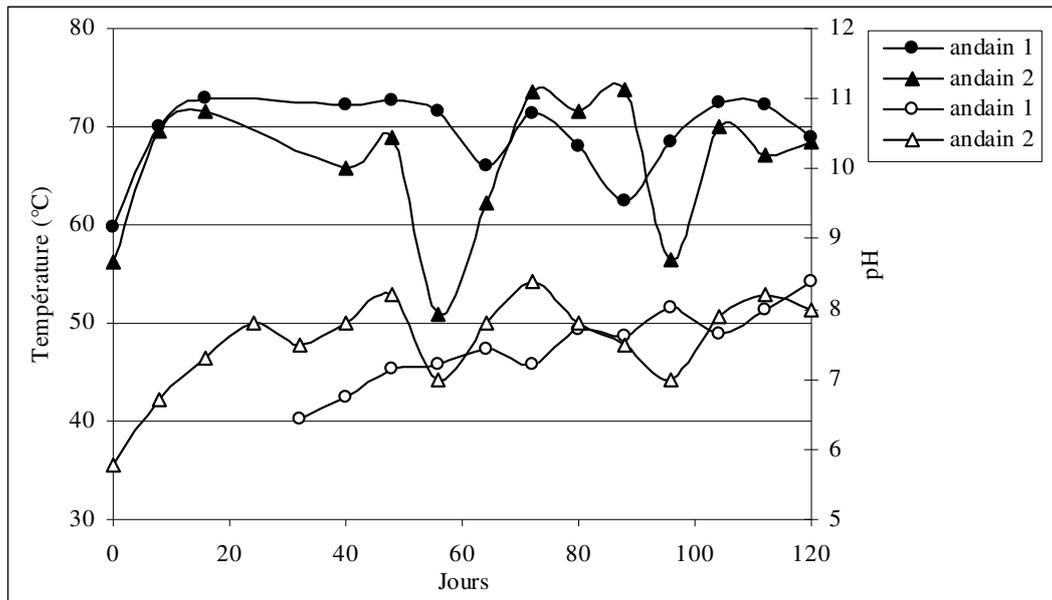


Figure 26 : Evolution du pH (Δ , \circ) et de la température (\blacktriangle , \bullet) sur 2 andains

L'évolution de la **pluviométrie**, fournie par météo France, a été comparée à celle de la teneur en eau dans les andains ; l'influence de la pluviométrie sur l'humidité des andains est évidente comme l'indique la Figure 27.

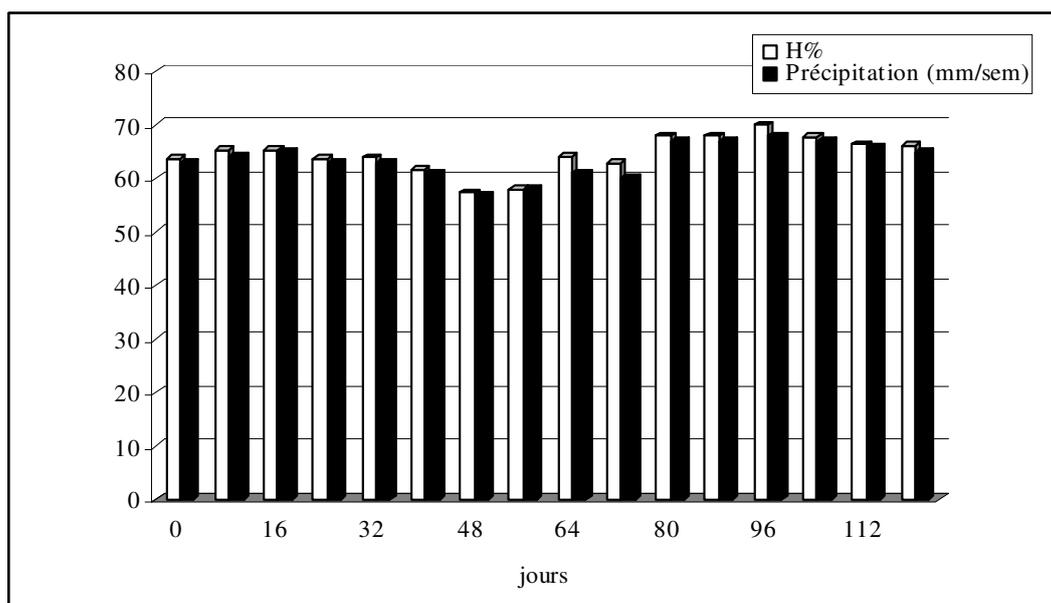


Figure 27 : Comparaison de l'humidité des andains et des précipitations locales

Les mesures de **densité**, effectuées avec un seau de 10 L, révèle une densification du substrat de 0,27 à 0,4 avec peu d'évolution durant la phase de fermentation stagnante à 0,28. Par contre, les actions mécaniques de broyage et de criblage augmentent considérablement la valeur de la densité par exemple de 0,32 à 0,4. Concernant le suivi des autres paramètres analytiques de cette seconde étude, ils sont en accord avec ceux obtenus précédemment.

L'évaluation du fonctionnement du procédé a confirmé la nécessité des diverses analyses effectuées lors de cette deuxième campagne d'étude. Ainsi chaque paramètre est un indicateur de fonctionnement du procédé, du processus de dégradation pendant la fermentation ou de l'action mécanique des équipements, comme l'indique la Figure 28.

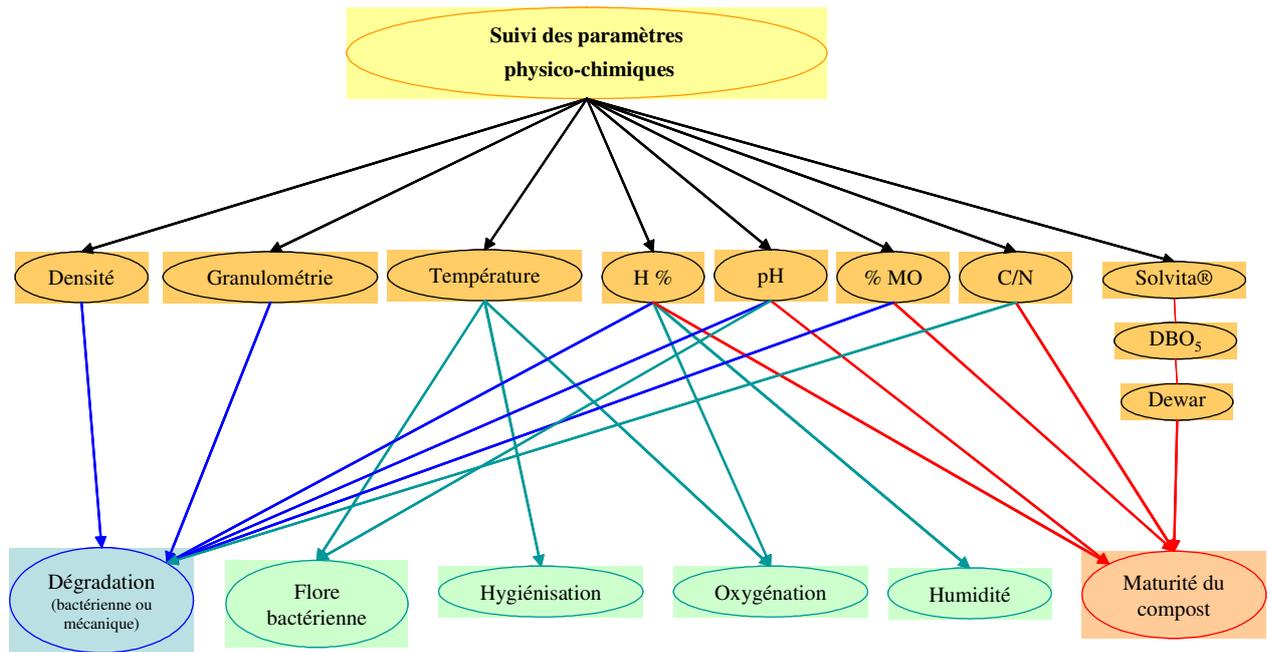


Figure 28 : Interférences entre les paramètres analytiques de l'étude

Les indicateurs choisis donnent une image du fonctionnement de l'usine, et mettent en lumière ses points forts et ses points faibles. Ils montrent notamment :

- la **saturation** de l'usine. Pour la désengorger, une diminution du flux des déchets entrants est peu envisageable, par contre, une extension de l'usine semble réalisable. De plus, cette saturation a également pour conséquence l'insécurité sur le site par manque de place : les andains surdimensionnés, réduisent les aires de circulation des engins. De même, les équipements sont inadaptés à un tonnage aussi élevé, et subissent une usure prématurée, justifiée par les indicateurs de coût de production par étape.
- le déroulement de la **fermentation**, qui pourrait être accélérée avec une augmentation des fréquences de retournement. Malgré tout le compost obtenu est de bonne qualité par rapport aux exigences de la réglementation.
- l'usure des marteaux du **broyeur** ne permet pas d'obtenir un broyage régulier dans le temps. Ce poste nécessite le plus de dépenses de fonctionnement, liées à la maintenance des marteaux principalement et à la consommation de carburant.
- Le sous-dimensionnement du **crible** et la quantité de refus trop forte. En effet, la quantité de compost produit dépend beaucoup de la charge de matériaux passant dans le crible, entraînant une perte de produit dans la fraction de refus. Il en résulte un coût supplémentaire, puisque du produit fini repart en tête de traitement.
- Le problème de **stockage** du compost actuellement laissé à l'air libre. Il faudrait prévoir un hangar afin de le protéger des conditions climatiques et qu'il conserve toutes ses qualités.

Le Tableau 40 récapitule comment, à partir des indicateurs de performance, des constats ont été établis et par la suite des recommandations préconisées.

Tableau 40 : Récapitulatifs des indicateurs et des préconisations

<i>Indicateurs mesurés</i>	<i>Constats</i>	<i>Préconisations</i>
- Taille des andains - Rendement des équipements - Temps de fermentation - Insécurité sur le site	Saturation de l'usine	Extension de l'usine avec la prise en compte de l'évolution des tonnages dans les 5 ans à venir
- Rapport C/N - M.O.T% - Autres tests de maturité - H% - Pluviométrie	Fermentation trop courte et mauvaise humidification	Augmentation du temps de fermentation Mise en place 'pluviomètre sur le site
- Température - H%	Mauvaise oxygénation	Aération : - augmentation du nombre de retournements - fractionnement du premier andain (optimisation du rapport surface/volume de l'andain) - système d'aération forcée
- Rapport C/N - Granulométrie	Mélange initial	Rapport C/N des déchets et des refus. Etablir un mélange optimal proche de 30
- Granulométrie - Coût de production	Fonctionnement du broyeur	Analyse des coûts liés à ce poste : changement possible ou choix d'un prestataire extérieur
- M.O.T% dans les refus - Rendement - H%	Mauvais fonctionnement du crible	Achat d'un nouvel équipement : trommel plus long, avec un acheminement par tapis élévateur afin de réduire les coûts

En conclusion, l'étape de validation sur site a permis la justification **technique** de la méthodologie d'expertise, élaborée à partir d'un concept purement **intellectuel**. Elle a permis de **rectifier** certains outils (questionnaires, supports), de comprendre les différentes contraintes d'exploitation en condition réelle et d'avoir également un aperçu du poids analytique de la méthodologie (nombre d'analyses et durée de réalisation). La première étude confirme la nécessité de réaliser un suivi **d'un lot de déchets**, dans le but d'obtenir une représentation la plus proche de la réalité du fonctionnement, et non pas de prendre en compte une image à un instant précis.

Ces études ont pu établir des constats puis proposer des préconisations pour améliorer le procédé de compostage. Cette démarche a été positive, puisque certaines modifications furent réalisées par la suite par l'exploitant : prestation de service pour le broyage, multiplication des retournements, achat d'un nouveau système de criblage. Ce cas simple a permis de tester les outils analytiques et méthodologiques et de les améliorer, ce qui permettra d'être directement opérationnel sur les usines d'ordures ménagères dans les P.E.D, qui sont beaucoup plus complexes et posent a priori plus de problèmes.

Chapitre 3 : Application de la méthodologie sur le site B

L'utilisation de la méthodologie sur un site industriel dans les P.E.D et dans des conditions normales de fonctionnement, va servir de vérification pour le choix pertinent des indicateurs en situation réelle. Ce chapitre présente les résultats de l'application de la méthodologie et ses optimisations sur site.

I. Organisation de l'expertise expérimentale

Avant la réalisation de l'expertise sur l'usine, une démarche rigoureuse doit être appliquée aussi bien pour la prise de contact que la planification des tâches. L'exploitant peut ainsi se rendre compte de la masse de travail à fournir et des besoins matériels et humains nécessaires au bon déroulement de l'étude.

I.1. Prise de contact

Elle s'est fait directement par courrier électronique avec l'exploitant en janvier 2003. Suite à de multiples échanges, les deux questionnaires lui ont été envoyés. Ces derniers ont été retournés un mois plus tard par le responsable d'exploitation de l'usine de compostage. Les échanges d'informations et tous les documents nécessaires ont été échangés. Ensuite la mission économique de l'ambassade de France a été informée du déroulement du projet. Par son biais, un déplacement en novembre 2003 a été organisé dans le but de prendre contact avec les divers acteurs locaux de la gestion des déchets : acteurs publics (Commune de la ville, Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture), et privés nationaux et internationaux (G.T.Z, A.I.D...) A la suite de cette mission des difficultés d'appréciation de l'intérêt de l'expertise, de la part de l'exploitant sont apparues, retardant d'une année le projet.

I.2. Analyse des réponses aux questionnaires

La collecte des déchets dans la ville est réalisée deux fois par jour, en P.A.P par camions compacteurs. Les déchets arrivant à l'usine sont très hétérogènes d'un camion à un autre. La collecte retenue a été celle du matin car satisfaisante en terme de quantité et de caractéristiques des déchets des districts collectés la collecte du matin et celle du soir étant quasiment identique. Le tonnage total concernant l'étude est **177,54 T**.

I.3. Planification des actions sur place

L'étude est basée sur un cycle complet du procédé, pour le cas de l'usine B cette durée est de 3 semaines, de l'entrée des déchets à la production du compost en fin de fermentation, ceci dans les conditions normales de fonctionnement de l'usine. Elle a débuté le 04 mai 2005, jour de référence noté J=0 et s'est achevée le mardi 25 mai 2005. Durant celle-ci les conditions climatiques ont été favorables : climat chaud et sans pluie.

De nombreuses analyses doivent être réalisées durant l'étude. Une comptabilisation de celles-ci ainsi qu'une liste du matériel, des équipements et des produits chimiques nécessaires ont été fournis à l'exploitant avant l'étude. En fonction des disponibilités des équipements sur place, les services d'un

laboratoire extérieur se sont avérés nécessaires, notamment pour les analyses de précision comme la détermination des teneurs en métaux lourds. Plusieurs laboratoires ont été alors contactés afin de connaître le tarif, le délais et les modalités d'envois des échantillons. Devant l'étendue des actions à mener et la durée limitée impartie de 3 semaines, tous les détails de l'étude ont été réglés avant le démarrage de l'étude. Pour cela, un « chronogramme » des tâches réalisables jour par jour a été envoyé à l'exploitant pour accord. Il combine la durée des analyses, le matériel et le personnel nécessaires (Annexe 2). Il sépare également les actions à effectuer pendant les 3 semaines d'expertise et celles à réaliser après l'étude. En effet, la durée de l'étude étant limitée, il faut prévoir la continuité du suivi du lot de déchets de référence par le personnel sur place. Des explications et les protocoles d'analyse leur ont été procurés dans ce but.

I.4. Préparation de la chaîne de compostage

Pour s'affranchir des erreurs provenant des déchets stockés avant l'étude, les installations de la chaîne ainsi que tous les containers sont vidés avant le passage de l'échantillon de référence (177,54T). Toutes les quantités entrantes et sortantes sont également pesées sur le pont bascule (± 10 Kg).

II. Application de la méthodologie

Les données brutes recueillies sur le site lors de l'étude serviront pour le traitement statistique par le logiciel Bilco®. Il permet de calculer un bilan, le plus cohérent possible, considérant toutes les mesures effectuées. Il restitue les débits et la composition des flux de l'usine. Le fonctionnement de l'usine et les différentes données brutes recueillies au cours des essais sont rentrés auparavant dans le logiciel. Pour rappel le schéma de fonctionnement de l'usine est présenté Figure 29.

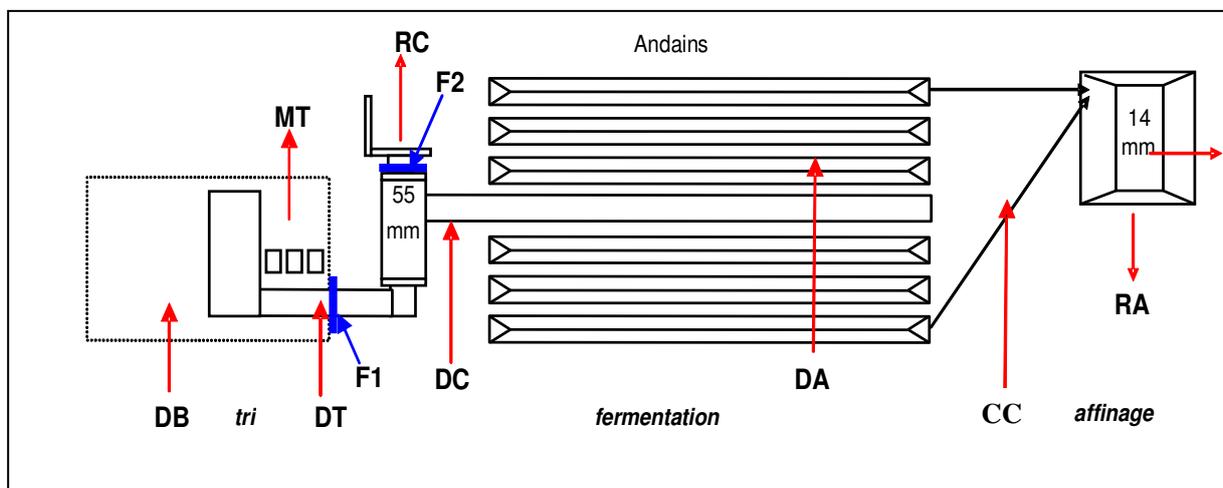


Figure 29 : Schéma du procédé de compostage de l'usine B

Avec

- DB : Déchets bruts (Flux 1)
- MT : Matériaux recyclables (Flux 2)
- DT : Déchets triés (Flux 5)
- DC : Déchets criblés (Flux 11)
- DA : Déchets en andain (10 jours)
- CC : Compost « coarse » (Flux 13)
- CF : Compost « fine » (Flux 16)
- RC : Refus de crible (Flux 10)
- RA : Refus d'affinage (Flux 14)
- F1 : Deferraillage primaire (Flux 4)
- F2 : Deferraillage secondaire (Flux 9)

II.1. Bilan pondéral

La quantité de déchets entrants et sortants est suivie tout le long du procédé aux différentes étapes précisées sur la Figure 10. Les flux pesés au pont bascule sont indiqués sur le Tableau 41.

Tableau 41 : Bilan pondéral

<i>Etape</i>	<i>Type de déchets</i>	<i>Flux (Kg)</i>	<i>% massique DB</i>
DB	Déchets bruts	177 540	100,0
DT	Déchets triés	*173 995	98,0
MT	Matériaux triés	3 545	2,0
DC	Déchets criblés	62 510	35,2
CC	Compost « coarse »	39 510	22,2
CF	Compost « fine »	15 760	8,8
RC	Refus de crible	108 140	60,9
RA	Refus d'affinage	23 000	12,9

* Calculé par différence

Le bilan pondéral du jour J correspond à l'entrée des déchets sur l'usine jusqu'à leur mise en andains. La quantité totale d'échantillons 177,5 T est traitée en 17 heures. L'usine a donc un débit de 10,4 T/h, réajusté à **11 T/h** sur 16 heures en tenant compte des arrêts de la chaîne de traitement dus à des problèmes mécaniques, et à des changements d'équipes. Ce bilan présente un écart de 1,9% ramené à **1,4%** en incluant les différents prélèvements pour l'échantillonnage. Cet écart provient des erreurs de mesure liées aux pesées du pont bascule (± 10 Kg), des pertes lors des différents transferts, des pertes dues au convoyeur de matière organique et de la non-comptabilisation de certains rejets lors de l'étude.

Le bilan pondéral évalué par le logiciel est plus détaillé car il tient compte de toutes les étapes du fonctionnement de l'usine, notamment, il différencie le tube et le crible dans le système Dano®. Dans un premier temps, les variables du système sont, la quantité de déchets en sortie du tri manuel, la perte en fermentation, le refus total de l'usine. Une évaluation de la perte dans le tube est estimée en fonction des dimensions du tube et du temps de séjour des déchets. Cette approximation de perte de

200 Kg sous forme de vapeur d'eau, limite le nombre d'inconnues et permet au logiciel de boucler le bilan pondéral exprimé en pourcentage massique de DB, présenté dans le Tableau 42.

Tableau 42 : Bilan pondéral d'après Bilco® avec le refus d'usine comme inconnue

<i>Etape</i>	<i>Valeur expérimentale (kg)</i>	<i>Valeur estimée (kg)</i>	<i>% matière brute</i>
<i>Ordures ménagères (DB)</i>	177540	175911	100,0
<i>Matières recyclables</i>	760	765	0,4
<i>Sortie tri manuel</i>	inconnue	175146	99,6
<i>Ferrailles 1</i>	1140	1147	0,7
<i>Entrée tube (DT)</i>	175640	173999	98,9
<i>Pertes tube</i>	200	200	0,1
<i>Sortie tube</i>	166930	173799	98,8
<i>> 55 mm</i>	108420	109651	62,3
<i>Ferrailles 2</i>	280	285	0,2
<i>Refus crible (RC)</i>	108140	109366	62,2
<i>< 55 mm (DC)</i>	62510	64148	36,5
<i>Pertes fermentation</i>	inconnue	24637	14,0
<i>Compost « coarse » (CC)</i>	39510	39511	22,5
<i>> 14 mm (RA)</i>	24055	24052	13,7
<i>Refus d'usine (RA+RC)</i>	inconnue	133417	75,8
<i>Compost « fine » (CF)</i>	15460	15459	8,8

A partir des données mesurées sur le terrain, le logiciel extrapole et fournit des valeurs calculées qui tiennent compte du pourcentage d'erreur sur la mesure introduite dans le logiciel, entre 1 et 10%. Dans un second temps, les variables sont échangées : la somme des refus du crible et des refus d'affinage fournit les refus d'usine soit 132 196 Kg et par contre, la perte dans le tube est devenue une inconnue.

La comparaison de ces deux essais indique une différence de 2,6% entre les pertes dans le tube liées à l'estimation et celles calculées par le logiciel. Cet écart se répercute immédiatement sur le flux de déchets sortant du tube, puis s'atténue au cours du procédé. Les erreurs de mesures liées aux pesées étant de 10%, le bilan pondéral est juste à 10% près. La différence de 2,6% au niveau des pertes dans le tube n'a que peu d'incidence sur le bilan global de l'usine. C'est pourquoi la suite de l'étude présente les résultats liés au premier essai avec une estimation de 200 Kg de perte dans le tube.

L'observation du bilan pondéral permet les remarques suivantes:

- Les **taux de tri** et de **déferrailage** représentent respectivement 0,4% et 0,9%, alors que le pourcentage **potentiellement séparable** est respectivement de 26,3% et 1,4%. Ce pourcentage est calculé avec les données du Tableau 45 et du Tableau 46. L'étape de tri apparaît très peu productive, contrairement à celle des ferrailles, éliminant la moitié de la quantité possible. L'intérêt du tri peut-être remis en cause puisque les trieurs éliminent seulement 1,5% de la totalité des déchets recyclables.
- les **taux de production** de l'usine sont : 22,5% de compost « coarse » et 9% de compost « fine »,

- le **taux de rejet** de l'usine (RC+RA) est de 75,8%.
- la **perte** estimée **durant la fermentation** est de 14% des ordures ménagères brutes. En tenant compte de la quantité d'eau ajoutée lors de la fermentation : 14 m³, elle s'évalue alors à 60,2% des déchets criblés entrant en fermentation, décomposée comme suit : 21,8% d'eau ajoutée et 38,4% en matière fermentescible. Cette quantité correspond à celle retrouvée dans la littérature : entre 50 et 75% de perte en masse durant la fermentation.

II.2. Bilan massique des matériaux séparés

Les matériaux sont séparés à plusieurs étapes du procédé : sur le quai de réception, lors du tri, mais également lors de la séparation des rejets après le tube. Dans les 3,545 T de matières triées et mesurées sur site, sont comptabilisés les :

- matières récupérées au niveau du quai de réception : 0,155 T soit 0,09 % DB ; 4,37 %MT
- rejets séparés lors du tri partant en décharge : 0,87 T soit 0,49% DB ; 24,54 %MT
- matières recyclables représentées dans le Tableau 43 .

Tableau 43 : Natures et quantités de matériaux séparés

<i>Etape</i>	<i>Catégorie</i>	<i>Masse (Kg)</i>	<i>%DB</i>	<i>%MT</i>
<i>Tri</i>	Papiers	220	0,12	8,73
	Verre	340	0,19	13,49
	Plastiques	320	0,18	12,70
<i>Déferraillage 1</i>	Métaux ferreux	1 140	0,64	45,24
<i>Déferraillage 2</i>	Métaux ferreux	280	0,16	11,11
	Matière organique	220	0,12	8,73
<i>Total</i>		<i>2 520</i>	<i>1,41</i>	<i>100,00</i>

La matière organique est récupérée avec les éléments ferreux et réintroduite dans l'andain en cours d'implantation.

Les éléments ferreux représentent la proportion la plus importante des matières recyclables triées soit 56,35% MT. La plus forte quantité est séparée par le tri primaire 45,24% ou 0,64%DB. Le tri secondaire, effectué juste avant la récupération de RC ne représente que 11,11% ou 0,16% DB. Les **performances horaires** pour 16 heures de fonctionnement sont respectivement de 71,25 Kg/h et de 17,5 Kg/h.

Le tri manuel sépare 880 Kg de matières recyclables de la quantité totale d'ordures ménagères. Durant l'étude, le nombre de trieurs a été fixé à 6 avec un tri ininterrompu pendant les 16 heures de fonctionnement de l'évolution du lot de référence. La **performance horaire par trieur** est de 9,2 Kg, valeur faible comparée à la littérature qui préconise une moyenne de 1,5 à 2 m³/h soit 1,2 T/h [Dulac, 2001].

La quantité d'éléments ferreux séparés est élevée. Les systèmes de déferraillage sont donc efficaces. Par contre, la quantité de plastique récupérée lors du tri est faible, remettant en cause l'intérêt du tri. La quantité totale de matériaux recyclables séparée est faible et voisine de 1,3% par rapport au flux de déchets entrants.

II.3. Caractérisation des déchets

Elle englobe le suivi granulométrique et la catégorisation des constituants des déchets. Deux types de caractérisation ont été réalisés sur déchets secs et sur déchets humides.

II.3.1. Echantillonnage

L'échantillonnage est réalisé au fur et à mesure du procédé afin de lisser les erreurs de prélèvement et de s'affranchir de l'hétérogénéité des déchets. Les quantités prélevées et celles concernant la réalisation des caractérisations sont indiquées dans le Tableau 44. La précision des mesures dépend de l'équipement analytique employé, des ponts bascule, des différentes balances de précision variable.

Tableau 44 : Variations quantitatives des prises d'échantillon (Kg)

	<i>Masse totale</i>		<i>Caractérisation sur déchets humides</i>		<i>Caractérisation sur déchets secs</i>		
	<i>Prévue</i>	<i>Réelle</i>	<i>Prévue</i>	<i>Réelle</i>	<i>Prélèvement prévu</i>	<i>Prélèvement réel</i>	<i>Quantité après séchage</i>
DB	500	400	300	300	200	100	56,7
DT	200	180	100	130	100	50	17,0
DC	200	170	100	56	100	70	27,9
DA	100	120	50	48,7	50	70	45,6
CC	100	100	50	47,6	50	50	27,7
CF	50	100	25	48,6	25	50	29,9
RC	100	100	50	44,7	50	50	49,6
RA	50	100	25	47,8	25	50	32,9

La quantité de déchets prélevée est dégressive avec l'avancement du procédé qui homogénéise le substrat. Ces quantités ont été légèrement modifiées par rapport au protocole prévu car elles n'ont été mesurées qu'à la fin du jour J pour le début du procédé. A cause du mode de séchage à l'air la quantité de déchets initialement prévue est divisée par deux. Les déchets étant entreposés dans une pièce, la durée de séchage est fonction de la quantité croissante d'échantillon. Plutôt que de réaliser une caractérisation sur des déchets pas totalement secs, la solution retenue est de diminuer leur quantité. Des tests de contrôle de l'humidité, par la méthode normée, ont confirmé l'état de déshydratation des déchets. Ils ont été réalisés sur la fraction la plus humide et la plus homogène : celle des fines < 20 mm. Une humidité résiduelle de 10 % est constatée pour les échantillons atteignant 15% pour DT.

II.3.2. Comparaison des résultats obtenus avec les deux types de caractérisation

Avant d'analyser la valeur des résultats obtenus grâce à la méthode de caractérisation et de discuter du fonctionnement du procédé, une comparaison des deux méthodes est nécessaire. La Figure 30 montre la différence des résultats obtenus entre la séparation granulométrique réalisée sur sec et celle sur humide, les résultats étant exprimés en pourcentage du flux de déchets entrants. Les valeurs positives correspondent à une masse plus importante sur sec, alors que les valeurs négatives affichent l'inverse, une masse plus grande sur humide.

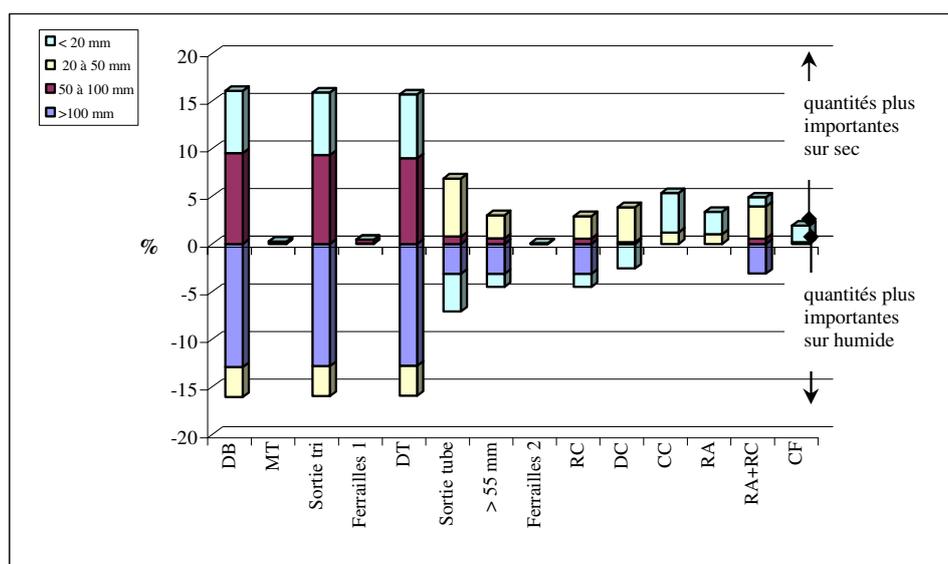


Figure 30 : Comparaison des résultats de granulométrie (en %)

La fraction supérieure à 100 mm est toujours plus élevée lors de l'analyse granulométrique sur humide et représente une différence maximale de 13% entre les deux mesures. Les particules de petite taille, à forte teneur en humidité, se collent dans les cavités ou aux déchets de taille supérieure. L'augmentation de la masse de la fraction 50-100 mm confirme ce phénomène qui contribue également à obtenir une quantité de fines plus élevée lors de l'analyse sur sec. Ce constat est notable surtout au début du procédé, avant le passage des déchets dans le tube. En effet, après ce dernier la quantité de fines trouvée dans l'analyse sur humide est plus élevée entre 1 et 5%.

La même méthode de calcul est employée pour connaître les performances entre les résultats de la catégorisation des déchets sur sec et sur humide. La masse de fines < 20 mm obtenues lors de la catégorisation est toujours supérieure sur sec pour les raisons évoquées précédemment. La masse des fractions des fermentescibles, des papiers-cartons et des textiles est plus faible sur sec, car elles absorbent l'humidité et se souillent en matière organique lors du procédé et, par contre, les quantités de fractions inorganiques, métaux, verres, inertes, sont plus élevées sur sec. La caractérisation sur humide est laborieuse en raison de la présence de matière organique, se collant aux fractions

inorganiques. Il devient alors difficile de séparer la matière organique lorsque que les particules se réduisent au cours du procédé.

Les différences notables entre les résultats obtenus de la caractérisation sur sec et ceux de la caractérisation sur humide sont essentiellement dues aux particules fines < 20 mm de matière organique collées sur les fractions supérieures, et à la souillure des déchets sur la chaîne de traitement. Pour la suite de l'étude, seuls les résultats sur humide seront présentés, car plus représentatifs des conditions de compostage.

II.3.3. Evolution de la granulométrie

Pour une meilleure compréhension du procédé, la répartition granulométrique de la chaîne principale : des ordures ménagères au compost « fine » est représentée

Figure 31 sans prendre en compte les différents flux séparés comme les matériaux recyclables, les éléments ferreux. Les résultats sont exprimés en pourcentage de déchets entrants.

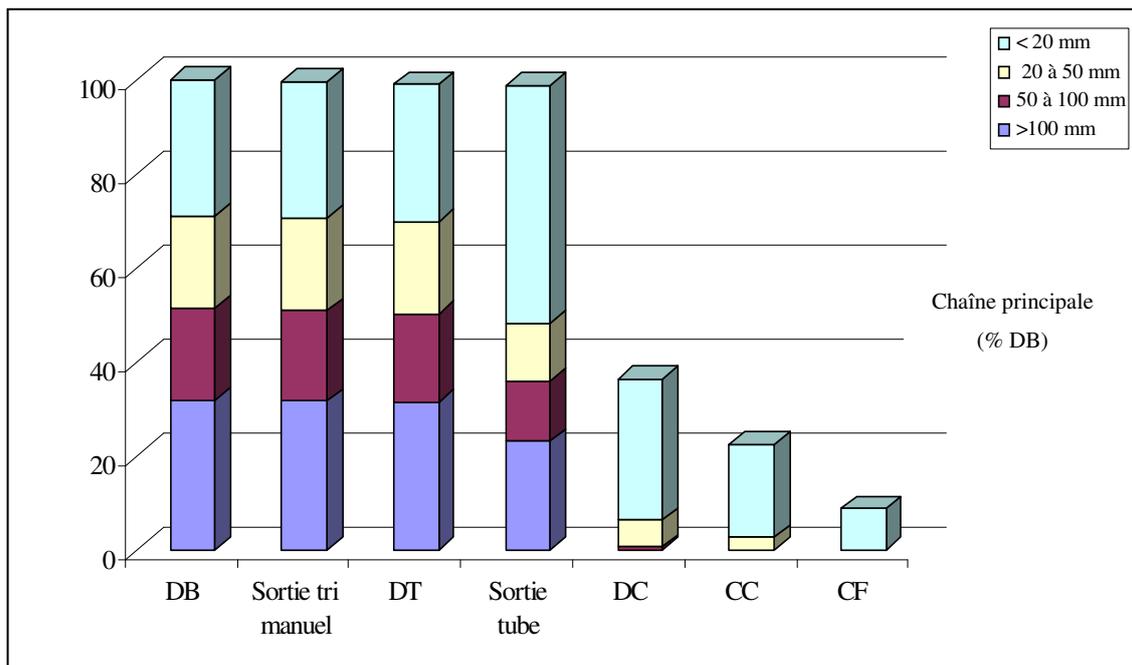


Figure 31 : Evolution de la granulométrie

Une réduction de la taille des particules est notée après le crible du tube : la quantité de fines < 20 mm augmente de 20%. Les fractions granulométriques supérieures sont légèrement réduites par le tri et le passage dans le tube. Les performances du crible sont indéniables puisque après le passage des déchets dans cet équipement, 82% du flux sont des fines < 20 mm.

L'analyse de la chaîne principale montre une modification de la granulométrie au profit des fractions fines et donc de la qualité du compost. La réduction granulométrique stagne lors de la fermentation. Les refus de crible sont constitués d'une part élevée de particules de granulométrie inférieure à 20 mm.

II.3.4. Evolution granulométrique par catégorie

Chaque fraction granulométrique est triée selon les 8 catégories choisies précitées. Les résultats sont exprimés en Kg de matières brutes dans le Tableau 45.

Tableau 45 : Evolution granulométrique par catégorie (kg)

Fraction granulométrique	Quantité (Kg)	175911	765	175146	1147	173999	200	173799	109651	285	109366	64148	24637	39511	24051	133417	15459
	Catégorie	Flux 1 DB	Flux 2 MT	Flux 3 Sortie tri	Flux 4 F1	Flux 5 DT	Flux 6 Pertes tube	Flux 7 Sortie tube	Flux 8 > 55 mm	Flux 9 F2	Flux 10 RC	Flux 11 DC	Flux 12 Pertes	Flux 13 CC	Flux 14 RA	Flux 15 RA+RC	Flux 16 CF
> 100 mm	<i>Fermentescibles</i>	18849	0	18849	0	18849	16497	2351	2351	0	2360	0	0	0	0	2360	0
	<i>Papiers-cartons</i>	14445	229	14216	0	14216	14216	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Textiles</i>	8945	0	8945	0	8945	-9887	18832	18832	0	18717	0	0	0	0	18717	0
	<i>Plastiques</i>	10487	104	10383	0	10383	-8700	19083	19083	0	19569	0	0	0	0	19569	0
	<i>Verre</i>	399	0	399	0	399	279	120	120	0	90	0	0	0	0	90	0
	<i>Métaux</i>	264	0	264	193	71	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Inertes</i>	1208	0	1208	0	1208	1208	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Autres</i>	1438	0	1438	0	1438	1274	163	163	0	328	0	0	0	0	328	0
100 à 50 mm	<i>Fermentescibles</i>	10671	0	10671	0	10671	823	9848	9055	0	9063	700	546	159	154	9218	0
	<i>Papiers-cartons</i>	6719	0	6719	0	6719	4936	1783	1783	0	1783	0	0	0	0	1783	0
	<i>Textiles</i>	4347	0	4347	0	4347	712	3635	3532	0	3534	56	0	56	56	3590	0
	<i>Plastiques</i>	6428	104	6324	0	6324	5359	964	897	0	897	204	0	204	204	1101	0
	<i>Verre</i>	2304	328	1976	0	1976	1770	206	206	0	-223	0	0	0	0	-223	0
	<i>Métaux</i>	2084	0	2084	898	1186	1157	29	29	29	2	9	0	0	0	2	0
	<i>Inertes</i>	267	0	267	0	267	-4873	5140	5140	0	5111	236	0	0	0	5111	0
	<i>Autres</i>	1439	0	1439	56	1383	443	941	941	0	940	0	0	0	0	940	0
50 à 20 mm	<i>Fermentescibles</i>	26950	0	26950	0	26950	17337	9613	3423	0	3404	6119	4158	1968	1871	5275	88
	<i>Papiers-cartons</i>	3511	0	3511	0	3511	1745	1766	1553	0	1553	205	164	50	46	1600	0
	<i>Textiles</i>	234	0	234	0	234	-439	673	612	0	621	129	0	129	115	735	14
	<i>Plastiques</i>	1109	0	1109	0	1109	-1050	2159	1761	0	1758	758	0	758	737	2495	20
	<i>Verre</i>	1047	0	1047	0	1047	-291	1338	897	0	896	753	0	753	739	1635	14
	<i>Métaux</i>	58	0	58	0	58	-259	318	200	200	5	110	0	112	109	114	0
	<i>Inertes</i>	1182	0	1182	0	1182	-1958	3140	2045	0	2044	2040	0	2043	1998	4042	43
	<i>Autres</i>	353	0	353	0	353	-869	1222	553	29	501	148	124	29	25	526	0
< 20 mm	<i>Fines</i>	51173	0	51172	0	51172	-39301	90474	36476	29	35781	52682	19605	33181	18099	53881	15281
	Somme	175911	765	175146	1147	173999	200	173799	109651	285	108736	64148	24598	39443	24152	132889	15459

Les résultats peuvent être négatifs pour les pertes dans le tube. Les boîtes de conserve se chargent en matière organique dans le tube, les textiles et les films plastiques sont souillés.

II.3.4.1. Catégorie fermentescibles

Les déchets bruts contiennent un fort pourcentage de fermentescibles. Le tube permet une descente granulométrique importante pour ces 2 fractions. Les refus de crible comprennent une quantité de fermentescibles, selon la granulométrie décroissante de : 2,2%, 8,3% et 3,1%; une quantité non négligeable est également retrouvée dans les refus d'affinage.

II.3.4.2. Catégorie verres

La quantité de verres dans les déchets est voisine de 2% du flux entrant. La majorité est contenue dans la fraction 100-50 mm. Le tri en élimine une faible partie (0,2% du flux entrant) dans cette fraction, puis le tube en réduit la granulométrie. Si au final la teneur en verre dans le compost « fine » est réduite par l'étape d'affinage, dans le compost « coarse », le plus commercialisé, elle n'est pas négligeable.

II.3.4.3. Catégorie plastiques

La quantité de plastiques est voisine de 10% du flux des ordures ménagères dont la majorité se situe dans la fraction supérieure à 100 mm. Le tri manuel élimine une très faible quantité de plastiques, et ces derniers sont ensuite souillés dans le tube par de la matière organique (gain en poids). Cependant, cette dernière étape, élimine la majorité du plastique de fraction supérieure à 100 et celle de 100 à 50 mm. Seul 0,4% de plastiques est perceptible dans le compost « coarse »

II.3.4.4. Catégorie métaux

La quantité de métaux dans les déchets urbains est faible. Le premier système de poulie magnétique sépare les métaux ferreux de granulométrie supérieure à 100 mm et la moitié de ceux de taille comprise entre 50 et 100 mm. La seconde poulie améliore cette séparation. L'étape du tube réduit la fraction granulométrique des métaux, par abrasion lors de leur contact avec les équipements mécaniques mais aussi en se cassant à l'intérieur du tube. Seulement, un très faible pourcentage, 0,1% des métaux est décelable dans la fraction 50-20 mm du compost « coarse ».

II.3.4.5. Catégorie inertes

Les inertes des ordures ménagères se situent dans les fractions > 100 mm et dans celles de 50-20 mm. L'action du Dano® augmente la quantité d'inertes trouvée dans les fractions les plus petites. Ainsi 1,2% d'inertes se retrouvent dans la fraction 50-20 mm dans le compost « coarse ».

II.3.5. Répartition par catégories de déchets

Chaque fraction granulométrique est triée en 8 catégories : fermentescibles, papiers - cartons, textiles, plastiques, verres, métaux, inertes, fines <20 mm et autres. Les résultats des catégories sont exprimés en % de déchets bruts.

Tableau 46 : Composition des flux en % calculés par rapport au flux entrant

Etape	Flux 1	Flux 2	Flux 3	Flux 4	Flux 5	Flux 6	Flux 7	Flux 8	Flux 9	Flux 10	Flux 11	Flux 12	Flux 13	Flux 14	Flux 15	Flux 16
	DB	MT	Sortie tri	Fer 1	Entrée tube	Pertes tube	Sortie tube	> 55 mm	Fer 2	RC	DC	Pertes	CC	RA	RA + RC	CF
Fermentescibles	32,10	0,00	32,10	0,00	32,10	19,70	12,40	8,43	0,00	8,43	3,88	2,67	1,21	1,15	9,58	0,05
Papiers-cartons	14,03	0,13	13,90	0,00	13,90	11,88	2,02	1,90	0,00	1,90	0,12	0,09	0,03	0,03	1,92	0,00
Textiles	7,69	0,00	7,69	0,00	7,69	-5,46	13,15	13,06	0,00	13,00	0,11	0,00	0,11	0,10	13,10	0,01
Plastiques	10,25	0,12	10,13	0,00	10,13	-2,50	12,62	12,36	0,00	12,63	0,55	0,00	0,55	0,54	13,17	0,01
Verres	2,13	0,19	1,95	0,00	1,95	1,00	0,95	0,70	0,00	0,43	0,43	0,00	0,43	0,42	0,85	0,01
Métaux	1,37	0,00	1,37	0,62	0,75	0,55	0,20	0,13	0,13	0,00	0,07	0,00	0,06	0,06	0,07	0,00
Inertes	1,51	0,00	1,51	0,00	1,51	-3,20	4,71	4,08	0,00	4,07	1,29	0,00	1,16	1,14	5,20	0,02
Autres	1,84	0,00	1,84	0,03	1,80	0,48	1,32	0,94	0,02	1,01	0,08	0,07	0,02	0,01	1,02	0,00
Fines < 20 mm	29,09	0,00	29,09	0,00	29,09	-22,34	51,43	20,74	0,02	20,34	29,95	11,15	18,86	10,29	30,63	8,69
Somme	100,00	0,43	99,57	0,65	98,91	0,11	98,80	62,33	0,16	61,81	36,47	13,98	22,42	13,73	75,54	8,79

Le **taux de fermentescibles dans les rejets** est de 13,5% dans RC et de 8,3% dans RA en pourcentage du flux correspondant. Dans le refus d'usine (RA + RC : flux 15), il reste 12,7% de déchets fermentescibles, 2,5% de papiers cartons (en raisonnant en % du flux correspondant) soit en moyenne un potentiel de plus de 15% encore valorisable.

Le **taux d'impuretés** dans le compost est respectivement de 7,4% pour CC et de 0,4% pour CF et celui des matières **plastiques** est de 2,4% et de 0,1% respectivement. Ces chiffres indiquent l'efficacité du crible à séparer les éléments indésirables pour la fraction > 20 mm. Le flux 13 (CC) comprend 5,4% de matières fermentescibles contre seulement 0,6% dans le CF pour une granulométrie supérieure à 20 mm. Afin de mieux visualiser l'évolution granulométrique des étapes principales, la Figure 32 représente l'évolution des catégories de déchets dans différents flux. Les pourcentages sont calculés par rapport au flux de déchets entrants.

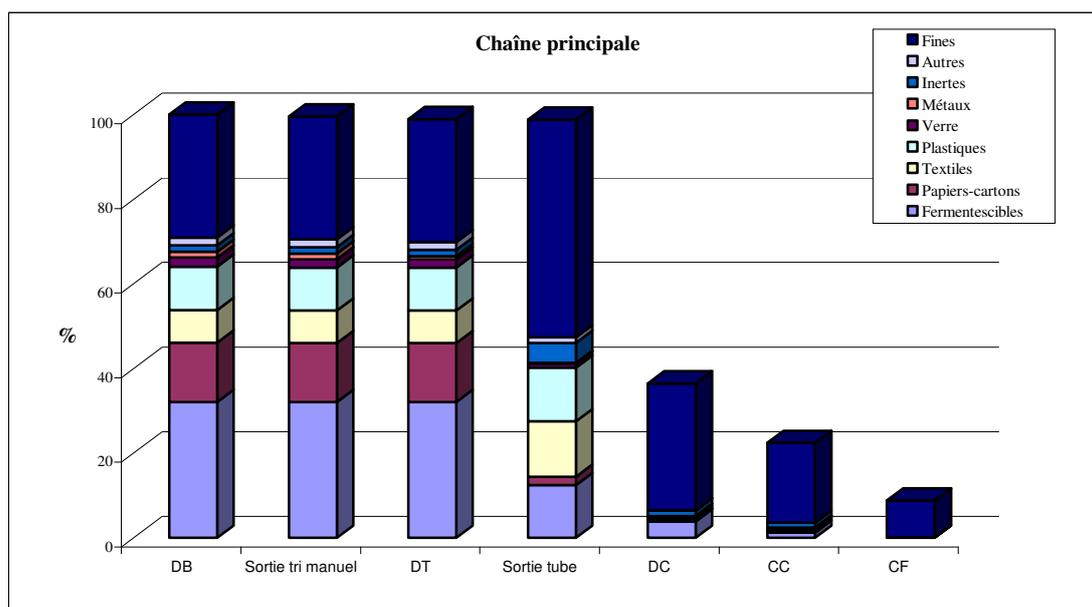


Figure 32 : Evolution des catégories de déchets

Après les étapes mécaniques, le flux est constitué de fermentescibles, de fines et d'une faible proportion d'inertes. La récupération optimale de la matière organique des déchets et sa transformation en compost, sont le premier objectif du procédé de compostage. Par conséquent, le suivi de la teneur en matière organique est primordial pour l'évaluation du rendement de l'usine. L'hypothèse suivante est prise : les fines < 20 mm sont composées à 80% de matière organique, puisque la fraction < 14 mm correspond au compost fine supposé riche en matière organique. La quantité de matières fermentescible dans la fraction > 20 mm et celle de matière organique contenue dans les fines < 20 mm sont cumulées dans la Figure 33 suite à l'hypothèse afin de schématiser cette évolution dans la chaîne directe du procédé.

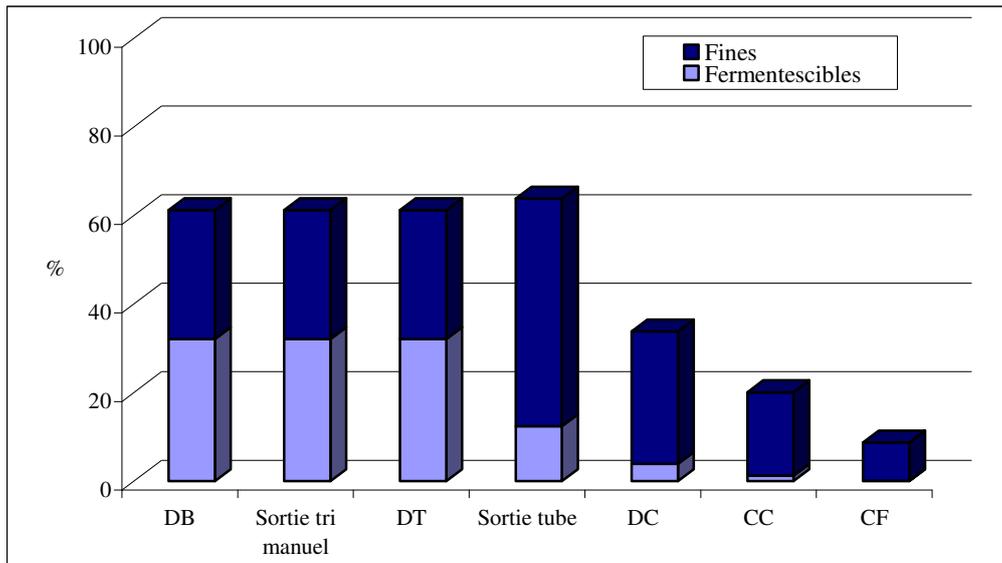


Figure 33 : Evolution de la matière organique dans la chaîne principale

La quantité de fermentescibles >20 mm diminue au cours du procédé, celle des fines augmente, notamment après le passage dans le tube où elle double en pourcentage massique. Un très faible pourcentage de fermentescibles > 20 mm apparaît encore dans le compost « coarse ».

Une chute de matière organique est notable après le passage des déchets dans le crible du tube. Afin de récupérer au maximum cette matière organique retrouvée dans les refus les deux paramètres humidité et homogénéité pourront être modifiés.

II.4. Densité

Les densités correspondent à la moyenne de 3 ou 4 mesures effectuées dans chaque camion ou dans chaque échantillon. La densité des matériaux recyclables n'est pas évaluée.

Tableau 47 : Evolution de la densité (T/m³)

<i>Etape</i>	<i>Nombre de mesures</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart type</i>	<i>Variance</i>
DB	100	0,30	0,760	0,578
DT	44	0,31	0,468	0,219
DC	40	0,69	0,682	0,465
DA	10	0,55	0,260	0,068
CC	10	0,62	0,362	0,131
CF	10	0,68	0,392	0,131
RC	36	0,20	0,277	0,077
RA	10	0,60	0,296	0,131

La densité des déchets ménagers de 0,3 semble correspondre à celle rencontrée dans la littérature pour une collecte en P.A.P traditionnelle réalisée avec des charrettes entre 0,13 à 0,4 [Aloueimine *et al.*, 2005 a & b ; Collingnon *et al.*, 2002 ; O.N.E.M, 2001 ; Zurbrugg & Ahmed, 1999 b ; Diaz, 1997 ; Kittelberger, 1994]. Or les déchets arrivent dans des camions compacteurs, la densité mesurée semble donc faible. Pour le vérifier, la densité moyenne de chaque camion a été calculée en fonction du poids du camion entrant et de sa capacité de transport. La valeur ainsi calculée est de **0,55 T/m³** s'échelonnant du simple au double de **0,40 à 0,93**. Cette estimation ne prend pas en compte le fait que les camions sont plus ou moins remplis. Même en incluant cette imprécision de mesure, la marge d'erreur entre les deux calculs est de 50%. Les erreurs de mesure sur le terrain proviennent de la diminution de la densité lors du déchargement du camion, de la prise des déchets par le « loader », puis du prélèvement réalisé à la main afin d'estimer la densité. La valeur ainsi obtenue n'est plus celle provenant des camions mais une approximation de celle arrivant sur la zone de tri et surtout pas à la densité des déchets dans les poubelles collectées.

L'évolution de la densité et par corrélation celle du volume de l'andain, sont conformes pour ce type de compostage [Mbuligwe, 2002], sauf pour la valeur DC. L'écart type des mesures de terrain est très élevé d'une part pour DB, comme expliqué précédemment, mais également pour DC. Une erreur de mesure sur cet échantillon est possible. Toutefois, une estimation de la densité de DC peut-être réalisée. Connaissant la valeur de la densité de CC et celle de DA (à mi-fermentation), et en supposant une évolution linéaire, la densité de DC est calculée à **0,48**. Une **densification** progressive et logique de 54% est alors observée tout au long du procédé et confirme les résultats constatés pour la granulométrie. La dégradation du déchet se fait progressivement lors du procédé, et le paramètre « densité » permet également l'ajustement de l'apport en oxygène et en eau pendant la fermentation.

II.5. Suivi de l'humidité

L'humidité joue un rôle primordial dans le procédé : d'une part lors de la dégradation, un manque d'eau engendre un ralentissement du processus de dégradation et intervient sur la productivité et sur la qualité, d'autre part lors du passage des déchets dans les équipements mécaniques, une humidité trop élevée pénalise leur efficacité en augmentant la perte de matière organique dans les refus [Begnaud, 1990].

Ce paramètre, suivi à chaque étape, est évalué au laboratoire de l'usine et par un laboratoire extérieur. De plus, lors de la réalisation de la caractérisation des déchets humides, la teneur en eau de chaque catégorie a été recalculée à partir de l'humidité de chaque fraction, résultats présentés dans le Tableau 48.

Tableau 48 : Comparaison des teneurs en humidité en %

<i>Etape</i>	<i>in situ</i>	<i>labo. ext.</i>	<i>recalculée</i>
DB	54,9	27	47,9
DT	63,9	17	51,8
DC	46,7	31	43,4
DA	47,6	20	31,2
CC	42,3	46	38,8
CF	35,2	32,5	33,6
RC	41,3	30	34,5
RA	32,0	41,8	24,4

L'évolution de l'humidité est cohérente avec le procédé actuel et la littérature [Gnanih, 1998 ; Liang *et al.*, 2003]. Le pourcentage d'humidité augmente après l'élimination des déchets de faible teneur en eau lors du tri. Il est ensuite maintenu entre 40 et 50% au cours de la fermentation, bien que la pratique technologique confirmée par la littérature propose une humidité optimale de 60% pour le compostage des déchets urbains [Richard *et al.*, 2002 ; Tiquia *et al.*, 1998]. La différence entre l'humidité mesurée et l'humidité recalculée provient de l'évaporation de l'eau lors de la caractérisation des déchets. Une comparaison plus précise entre les humidités estimées sur l'usine et celles évaluées par le laboratoire extérieur est représentée sur la Figure 34.

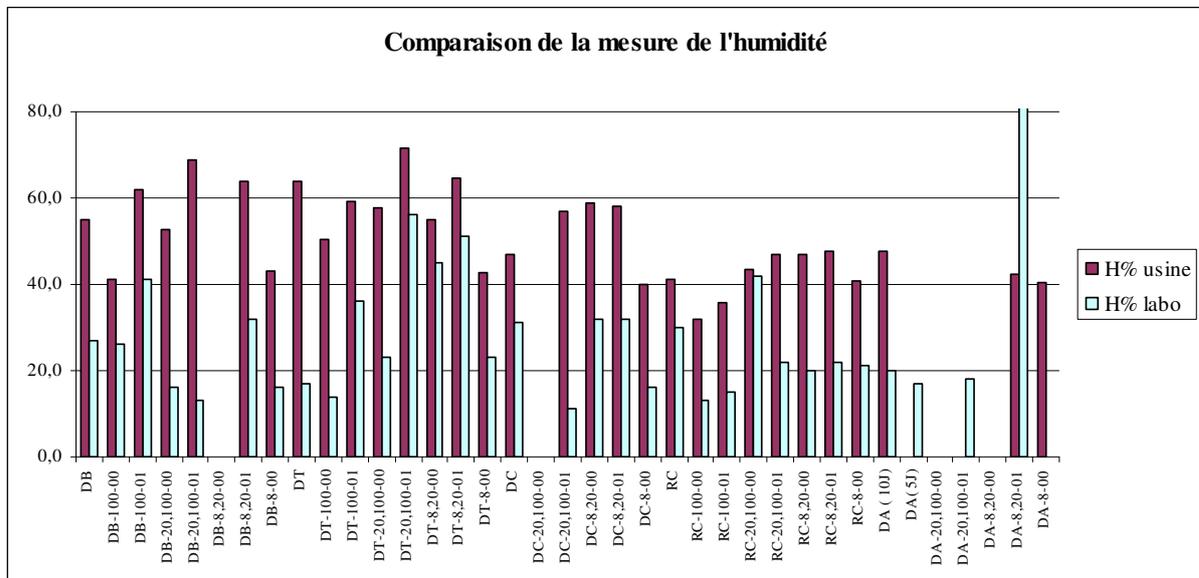


Figure 34 : Comparaison de l'humidité in situ et calculé (%) pour les différents échantillons triés

La grande variabilité des résultats d'humidité entre les mesures du laboratoire extérieur et celles mesurées sur site s'explique par la durée de stockage des échantillons entre les deux mesures qui est

quasiment immédiate sur site et de 4 à 6 jours pour le laboratoire extérieur. L'humidité mesurée dans le laboratoire de l'usine est plus précise que celle mesurée par le laboratoire extérieur ou que celle recalculée. Pour cette raison, elle sera utilisée par la suite dans les calculs.

II.6. Evolution des paramètres principaux

De nombreux paramètres permettent de juger de l'évolution et de la maturité d'un compost. Les paramètres principaux ont été suivis à chaque étape du procédé, pour chaque fraction granulométrique et pour chaque catégorie de fermentescibles : perte au feu, rapport C/N, NaCl et certains métaux. La valeur de chacun est ramenée au pourcentage du flux correspondant, en le pondérant avec le pourcentage granulométrique. Lors de cette étude, un échantillon de déchet brut a été omis lors du prélèvement, DB 20 à 50 mm, et un second n'a pu être analysé car présent en très faible quantité moins de 500 g et jugé non représentatif, DC 100 à 50 mm. C'est pourquoi dans les résultats des paramètres analytiques, une différence est constatée entre les résultats obtenus pour l'échantillon brut et l'addition des fractions granulométriques.

II.6.1. Matière organique totale par perte au feu

La réglementation en vigueur dans le pays du site B, donne une valeur minimale de la teneur en matière organique totale (M.O.T) dans le compost de 17%. La Figure 35 représente des histogrammes par paires : le premier indique la teneur en M.O.T par fraction granulométrique et le second la teneur totale de l'échantillon.

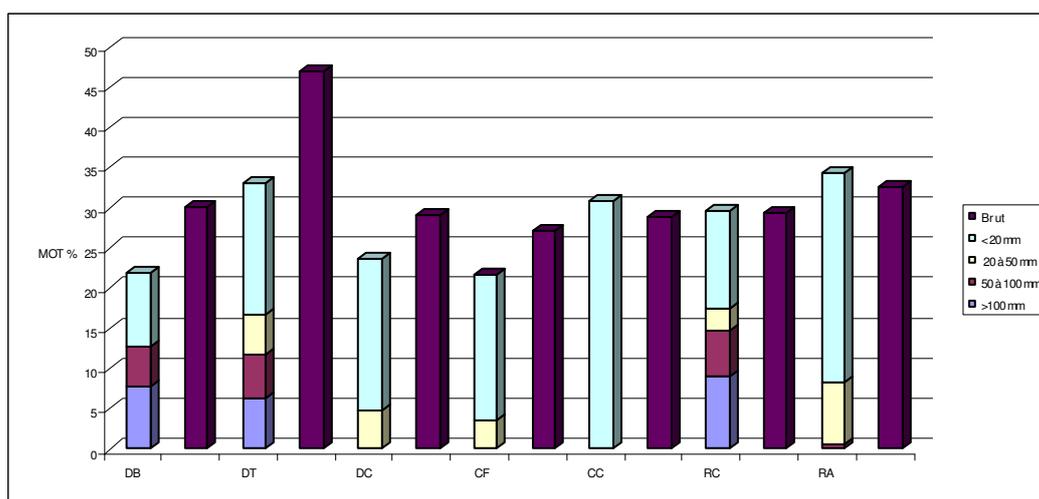


Figure 35 : Evolution de la matière organique totale

La teneur en M.O.T des déchets augmente après le tri puisque certains constituants inorganiques sont séparés de l'échantillon. La suite du procédé ne fait pas apparaître de forte variation. De plus, la

majorité de la M.O.T est contenue dans les fines < 20 mm et la somme des fractions granulométriques coïncide avec la valeur de référence du flux. Les pertes en M.O.T lors du procédé sont de l'ordre de 30%, en se référant à la valeur de DT (et non DB). Cette perte est du même ordre que les variations mesurées classiquement dans la littérature [Atkinson *et al.*, 1996 ; Canet & Pomares, 1995 ; Iannotti *et al.*, 1994]. Les refus contiennent une part non négligeable de M.O.T, et sont éliminés en décharge. La teneur en M.O.T habituellement rencontrée dans le compost produit dans les P.E.D est très variable se situant de 20 à 65% [Hafid, 2002 a ; Waas, 1997 ; Dalzell *et al.*, 1988]. Cette variation s'explique par la nature même de la composition des déchets compostés et également par le procédé et son fonctionnement.

II.6.2. Rapport Carbone / Azote

Le carbone est évalué par une méthode chimique d'oxydation au bichromate de potassium et l'azote par la méthode kjeldahl. La réglementation en vigueur donne une valeur minimale uniquement pour la teneur en azote dans le compost de 0,46% qui est toujours dépassée lors du procédé, comme le montre la Figure 36.

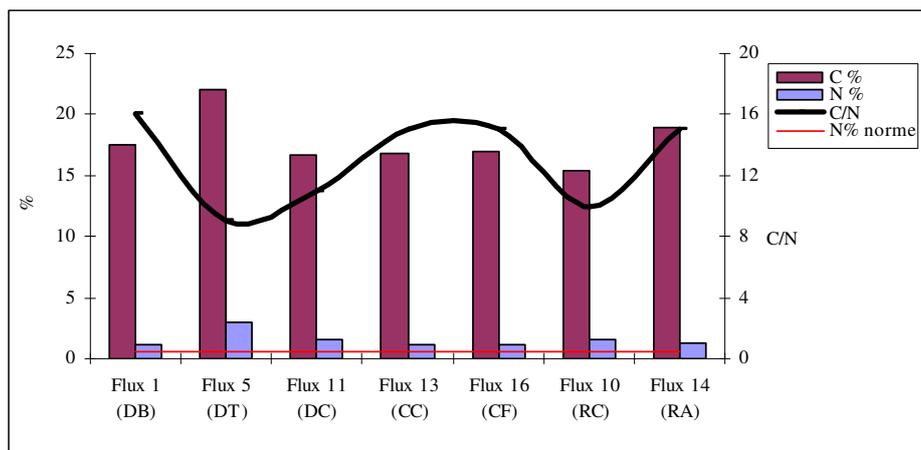


Figure 36 : Evolution du rapport C/N

Les teneurs en carbone organique et en azote suivent la même évolution que celle de la M.O.T, à savoir une augmentation après le tri due à la séparation de matériaux peu fermentescibles, puis une légère diminution due à la séparation des refus après le tube. Le rapport C/N est initialement de 16, ce qui est faible pour des ordures ménagères. Il devrait se situer d'après la littérature entre 30 et 40 [Smith *et al.*, 2004 ; Sadaka & El Taweel, 2003 ; Mbuligwe *et al.*, 2002 ; Larsen & Mc Cartney, 2000]. Cela provient de la teneur importante en résidus fibreux de canne à sucre, constitués d'un pourcentage important d'azote.

II.6.3. Concentration en sel NaCl

Le sel, NaCl, est pris en compte dans les critères de la réglementation pour la qualité du compost. Les résultats des analyses (Figure 37) signalent que la valeur réglementaire de 5,5% n'est jamais atteinte lors des différentes étapes du compostage. Cette valeur réglementaire du taux de NaCl est en relation, d'une part, avec la situation de l'usine de compostage sur le littoral méditerranéen, et d'autre part, avec le mode d'irrigation des cultures. En effet, ces dernières sont arrosées avec de l'eau provenant des nappes phréatiques, chargée en NaCl. Il est donc judicieux de ne pas épandre sur les terres agricoles un produit avec une teneur en sel élevée.

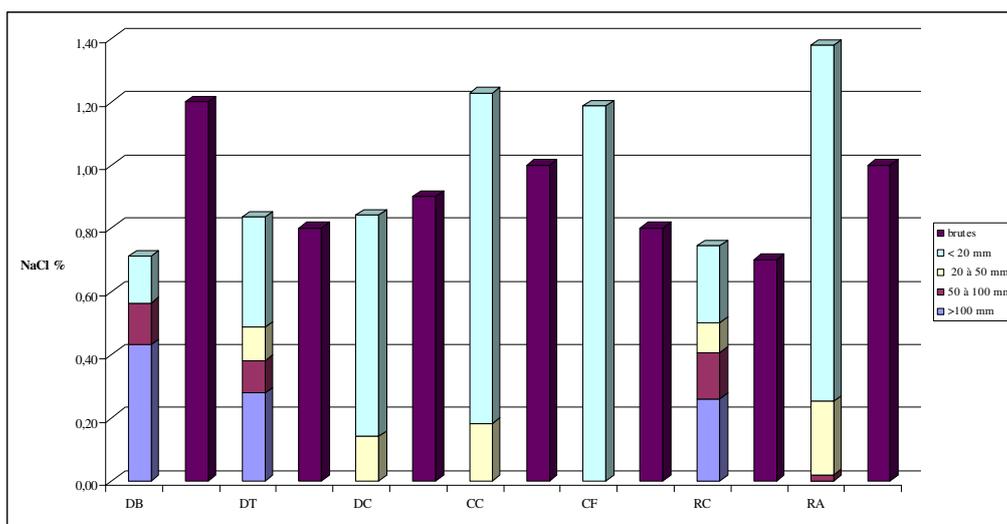


Figure 37 : Evolution de la concentration en NaCl au cours du compostage du site B

La teneur en sel est principalement contenue dans les fines < 20 mm, elle est très faible, entre 0,70 et 1,40%. Un écart est notable entre les valeurs de l'échantillon brut et la somme de celle obtenue par granulométrie, correspondant à l'erreur sur la mesure.

II.6.4. Métaux lourds

Le but étant de connaître l'évolution des teneurs en métaux pendant le procédé de compostage, seuls quelques métaux aux caractéristiques spécifiques ont été retenus. Le cadmium et le plomb sont des éléments toxiques. Ils sont fréquemment retrouvés dans les ordures ménagères des P.E.D à cause de leur utilisation comme éléments constitutifs des piles [Soumaré, 2003 ; Matejka *et al*, 2001 ; Sogreah, 2001 ; Soclo, 1999]. Le cuivre est un oligo-élément essentiel au développement des plantes, mais toxique à certaines doses. Enfin, le fer sert de traceur puisque contenu à des proportions relativement élevées dans les déchets.

Tableau 49 : Teneurs en métaux exprimés en mg/kg de MS

	DB	DT	DC	CC	CF	RC	RA
Fe	2040	2125	2425	4860	5330	1950	5130
Cu	123	49	304	329	356	240	277
Pb	468	276	187	1140	199	462	332
Cd	1	/	/	/	1	/	3

/ : Non détectable

La teneur en cadmium est très faible entre 0 et 1 mg/Kg de matière sèche et trop proche de la limite de détection de l'appareil. La teneur en plomb est élevée dans les refus de crible et faible pour le substrat entrant en fermentation. Une augmentation de la teneur en métaux est à souligner après le tube. La réduction granulométrique lors du passage des déchets dans le tube peut-être à l'origine de la contamination des échantillons en métaux. Pour référence, les valeurs limites de teneur des métaux lourds selon plusieurs législations [Brinton, 2000 ; Bionet, 2002 ; Hoog *et al*, 2002] sont rappelées dans le Tableau 16 de la partie 1 : Analyse bibliographique. Le projet de norme française NF U 44-051 préconise comme valeurs limites une teneur en Cd de 3 mg/Kg, en Cu de 300 mg/Kg et en Pb de 180 mg/Kg (d'autres méthodes As, Hg, Ni, Cr, Se et Zn sont aussi limitées). Seules les teneurs en plomb dans les composts produits sont supérieures aux préconisations du projet de norme : celle du compost « coarse » semble toutefois excessive, c'est sans doute dû à une erreur d'échantillonnage. La répartition des métaux en fonction de la granulométrie est indiquée sur les figures suivantes représentant l'évolution de la concentration en métal considéré en mg/Kg :

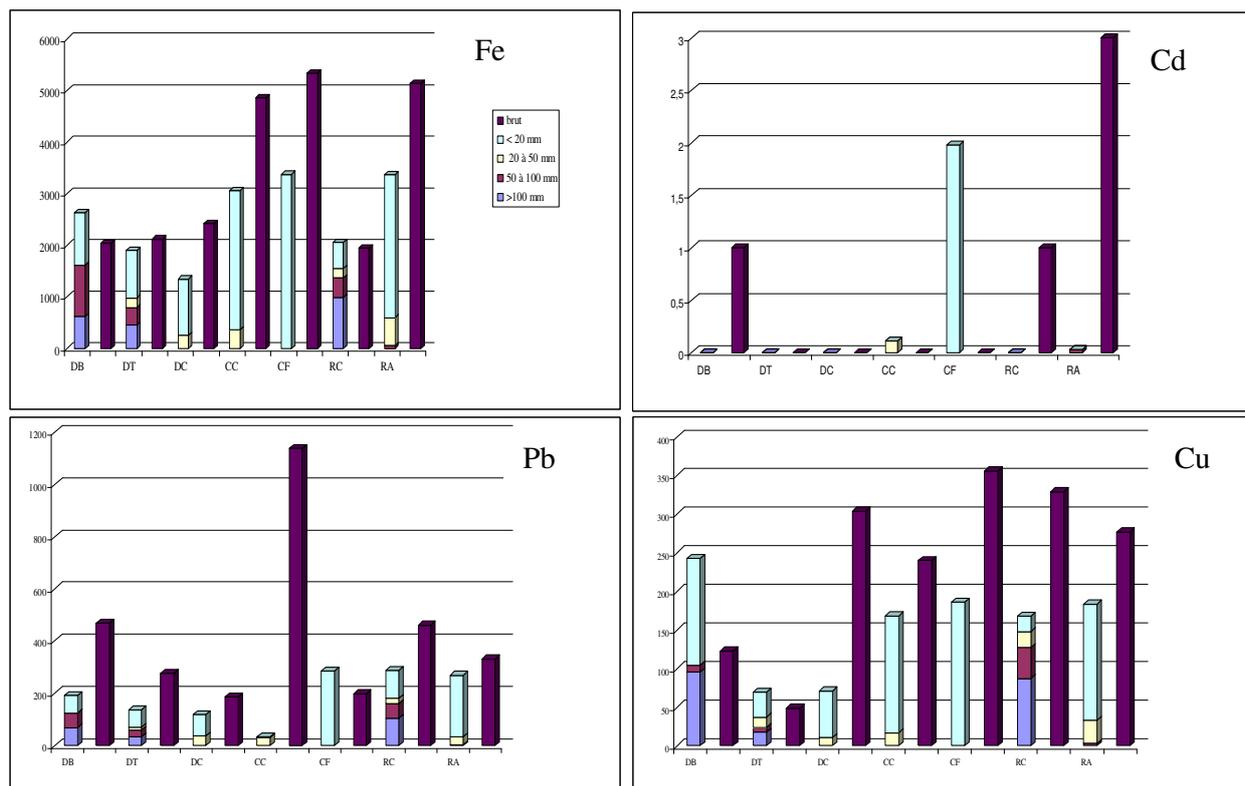


Figure 38 : Evolution des teneurs en Fe, Pb, Cu, et Cd dans les différentes fractions granulométriques au cours du compostage (mg/Kg)

Au vu des résultats, on constate que le compost se charge en fer et en cuivre lors du procédé, du notamment à un phénomène de concentration des fractions fines, les grosses disparaissant au profit des plus faibles. Dans le compost (CC, CF) la majorité des métaux présents se retrouve dans les fractions les plus fines. Concernant le Pb, sa concentration diminue avec l'avancement du procédé, si la valeur aberrante de CC n'est pas prise en compte. Le suivi du cadmium n'étant pas précis, dû à la méthode de mesure utilisée, cet indicateur ne sera pas retenu dans notre cas. Mais pour s'assurer de la qualité du compost et de son innocuité vis-à-vis des métaux toxiques, d'autres métaux (Cr, Ni, Hg, As...) doivent être analysés au cours du procédé. Il est surtout important de suivre les métaux toxiques (Cr, Cd, Pb, Hg, As, Se).

II.6.5. Evolution de la teneurs en inertes dans les fines < 20 mm

Les tests des inertes sont réalisés sur la fraction < 20 mm de tous les échantillons, en distinguant les sous fractions 20-2,8 mm et < 2,8 mm. Ce test détermine la quantité de plastiques, de verres et de matières inertes dans la fraction la plus fine du compost difficile à trier manuellement.

Tableau 50 : Evolution des sous fractions < 20 mm en %

<i>Etape</i>	<i>Plastiques 20 à 2,8 mm</i>	<i>Verres 20 à 2,8 mm</i>	<i>Métaux 20 à 2,8 mm</i>	<i>Matière organique 20 à 2,8 mm</i>	<i>Fines < 2,8 mm</i>	<i>Somme</i>
<i>DB</i>	1,13	0,97	3,08	74,51	20,31	100
<i>DT</i>	2,53	2,72	0,7	55,01	39,04	100
<i>DC</i>	3,55	5,81	1,07	34,07	55,5	100
<i>DA</i>	3,61	2,25	0,17	65,59	28,38	100
<i>CC</i>	1,73	1,86	/	59,51	36,9	100
<i>CF</i>	0,69	/	/	42,41	56,9	100
<i>RC</i>	1,75	0,84	0,14	78,11	19,16	100
<i>RA</i>	5,13	9,5	2,3	66,63	16,44	100

/ : Non détectable

La présence de plastiques, verres et métaux est à noter dans la fraction 20-2,8 mm. La quantité de plastique diminue au cours du procédé de 39%. La fraction métaux > 2,8 mm est totalement éliminée. Seule la fraction du verre augmente après le passage dans le Dano®. Les résultats pour le compost « coarse » et le compost « fine » peuvent être comparés au projet de révision de la norme NF U 44-051, définissant les valeurs limites en inertes et impuretés et présentés dans le Tableau 51 :

Tableau 51 : Projet de révision de la norme NFU 44-051

<i>Nature</i>	<i>Valeurs limites</i>
<i>Films + PSE > 5 mm</i>	< 0,3% Ms
<i>Autres plastiques > 5 mm</i>	< 0,8% Ms
<i>Verres + métaux < 2 mm</i>	< 2,0% Ms

Bien que les échantillons aient été criblés à des dimensions différentes, les deux types de compost présentent des teneurs en inertes et en impuretés plus élevées, que les teneurs préconisées dans le projet de norme. Les quantités de plastiques, de verres et de métaux devront donc être réduites dans le compost « coarse » et « fine ». De plus, lors de l'analyse de la matière organique dans le paragraphe II.3.3. Evolution de la granulométrie, l'hypothèse de 80% de matière organique dans les fines a été émise et est en partie validée puisque ces teneurs varient en fonction du procédé. Cependant, cette analyse est un bon indicateur de la constitution de la fraction la plus fine si elle est réalisée dans des conditions permettant d'assurer un résultat fiable.

II.6.6. Validité des résultats

Les résultats présentés ci-dessus correspondent à des caractérisations sur déchets humides. Toutefois, dans une démarche de validation de la méthodologie, quelques échantillons provenant de la caractérisation sur déchets secs ont été également analysés afin de réaliser une comparaison. Les échantillons choisis sont les déchets bruts pour leur hétérogénéité, un refus, celui d'affinage, et également les deux types de composts.

La variabilité des résultats obtenus est représentée sur le Tableau 52 en pourcentage d'erreur entre les mesures obtenues pour la caractérisation sur sec et celles sur humide. Les valeurs positives correspondent à des quantités d'échantillons plus fortes obtenues par caractérisation sur sec, à l'inverse les valeurs négatives reflètent l'obtention de résultats plus forts sur humide.

Tableau 52 : Pourcentage d'erreurs sur les paramètres physico-chimiques entre la caractérisation sur matière sèche et sur matière humide

<i>Différence sec-humide</i>	<i>Cendres %</i>	<i>C/N</i>	<i>MO%</i>	<i>NaCl%</i>	<i>Fe (ppm)</i>	<i>Cu (ppm)</i>	<i>Cd (ppm)</i>	<i>Pb (ppm)</i>
DB-100-00	7,0	150,0	25,4	-18,5	30,3	-62,2	0,0	1,3
DB-100-01	100,0	87,5	50,5	112,1	-71,4	-75,6	0,0	-24,2
DB-20,100-00	110,0	128,6	132,3	22,1	-49,5	-57,4	0,6	-43,3
DB-20,100-01	100,0	142,9	123,7	95,0	-63,4	-88,5	0,0	-4,2
DB-8-00	46,0	71,4	37,9	-27,9	-63,4	-67,6	0,0	65,2
CC-8,20-00	10,0	0,0	-13,6	7,0	-24,3	-32,7	0,0	0,7
CC-8,20-01	2,0	0,0	-34,7	43,5	-12183,7	-78,1	0,0	0,1
CC-8-00	-43,5	0,0	0,0	-30,0	-35,6	-31,5	0,0	72,8
CF-8,00	-32,4	0,0	-20,5	-166,7	-9,3	61,8	-100,0	49,6
RA-100,20-00	-4,3	0,0	-23,5	20,0	-47,0	-41,5	0,0	40,3
RA-100,20-01	-14,3	-6,7	22,9	38,9	-6,0	94,0	100,0	79,4
RA-8,20-00	-36,5	0,0	-34,2	-145,3	-2,3	-24,4	0,0	43,0
RA-8,20-01	-115,6	0,0	-18,2	-50,0	1,0	-56,0	0,0	50,8
RA-8,00	11,4	0,0	-54,6	34,9	-40,4	30,0	0,0	3,9
Min	-115,6	-6,7	-34,7	-166,7	-12183,7	-88,5	100	-43,3
Max	110,0	150,0	132,3	112,1	2101,9	149,2	100	287,2

Le premier constat notable est le fort pourcentage d'erreur sur les déchets bruts, provenant de l'hétérogénéité des échantillons. Il est important de remarquer que les pourcentages sont calculés par rapport à la valeur mesurée sur déchets humides. Ainsi le taux de NaCl reflète de très grandes disparités, or les mesures s'échelonnent entre 0 et 0,8%.

Les résultats sont très différents d'un type de caractérisation à l'autre surtout pour les déchets bruts. Cela s'explique par deux facteurs : premièrement l'hétérogénéité et donc la mauvaise représentativité du prélèvement, deuxièmement la différence de composition des déchets provenant de la nature même du type de caractérisation, par exemple, les quantités de matières fermentescibles. En conclusion, les échantillons issus d'une caractérisation sur sec et ceux issus d'une caractérisation sur humide sont difficilement comparables. Cependant la méthode de caractérisation sur déchets humides reste la plus représentative du procédé.

III. Qualité du compost

Des analyses ont été réalisées dans le but de suivre l'état de dégradation des déchets dans les andains au cours de la phase de fermentation. Les paramètres globaux, les formes de l'azote, et des tests de maturité sont analysés tous les 5 jours lors de la fermentation.

III.1. Paramètres globaux

Les paramètres globaux de la dégradation tels que l'humidité, le pH et la température sont présentés dans la Figure 26 .

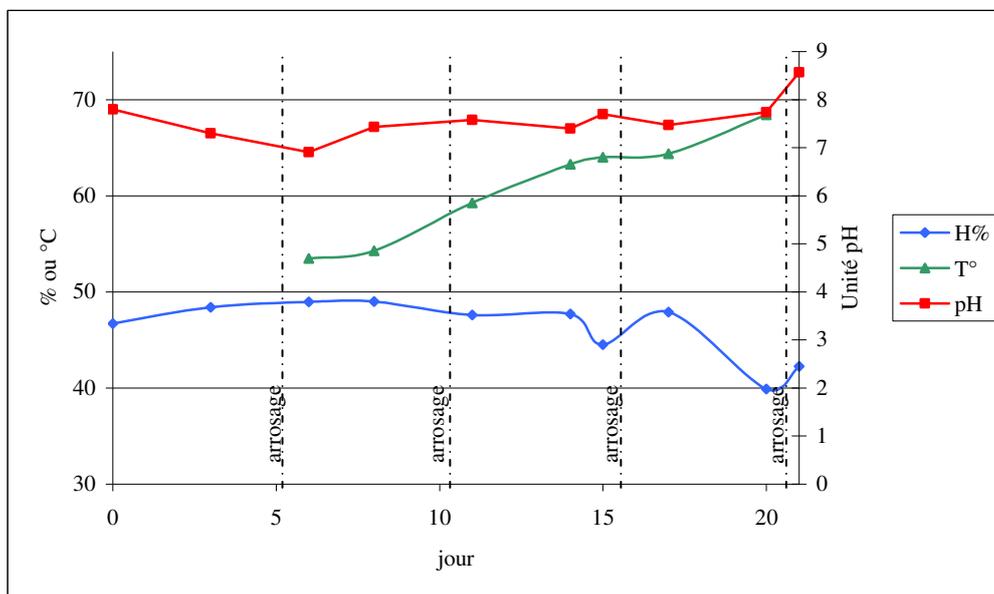


Figure 39 : Suivi des paramètres globaux (H%, T°, pH) de la fermentation en andain

L'évolution de la température n'indique pas la chute caractéristique due aux retournements [Mbuligwe *et al.*, 2001 ; Matejka *et al.*, 2001]. De plus, elle est en constante montée alors que la fin de la maturité est marquée par une température constante voisine de la température extérieure. Par contre la durée et les valeurs des températures atteintes correspondent aux critères requis pour une hygiénisation [Noble & Roberts, 2003 ; Lucero-Ramirez, 2000 ; Déportes, 1995]. Des mesures plus rapprochées par exemple tous les deux jours permettront d'améliorer le suivi de la température et de visualiser les différentes phases d'évolution de la température.

La teneur en humidité est faible tout au long du processus de dégradation, ne dépassant pas les 50%. Si cette dernière est réajustée vers 60% [Rytz, 2001 ; Tiquia *et al.*, 1998], la dégradation se fera plus rapidement avec une montée probable en température plus importante. Le pH est stabilisé entre 7

et 8 mais il subit une légère augmentation vers 9 le dernier jour alors que cette évolution doit se stabiliser vers la neutralité voisin de 7-8 [Sanchez-Montero, 2000 ; Soclo, 1999].

III.2. Evolution de l'azote

Les formes de l'azote analysées sont les nitrates, les nitrites et l'ammonium et l'azote organique à partir du NTK. Les analyses ont été réalisées sur une solution aqueuse de compost à 5 g/L et les résultats sont présentés dans la Figure 40.

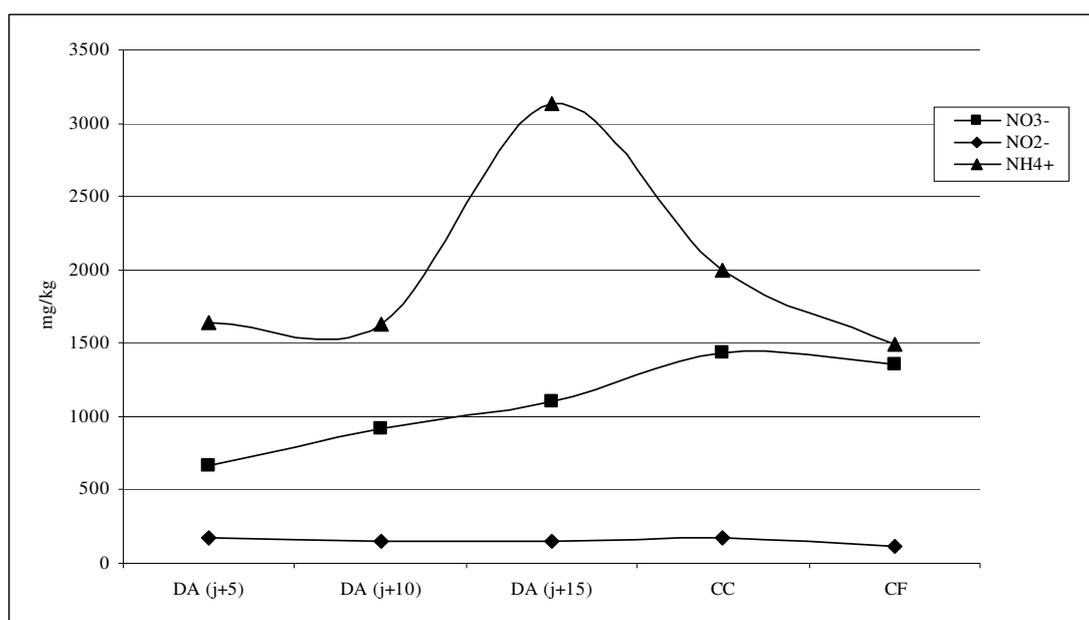


Figure 40 : Evolution des formes de l'azote

La teneur en nitrate augmente progressivement et celle en ammonium atteint un maximum après quinze jours de fermentation. Cette évolution est fonction de la phase d'alcalinisation : correspondant à une hydrolyse bactérienne de l'azote avec production d'ammoniac (NH_3) associée à la dégradation de protéines et à la décomposition d'acides organiques, augmentant le pH du milieu [Haug, 1993 ; Mustin, 1987]. Le suivi de ces paramètres permet donc d'estimer les phases de la dégradation et de caractériser l'état d'avancement du processus de dégradation.

III.3. Test simplifié d'évaluation de la maturité

Le test Solvita® est un test colorimétrique d'évaluation de la maturité du compost, dépendant de l'opérateur pour la perception des couleurs. Afin de limiter ces erreurs, 2 opérateurs ont jugé les résultats colorimétriques de ces tests présentés dans le Tableau 53.

Tableau 53 : Résultats des tests Solvita®

<i>Solvita®</i>	<i>NH₃</i>	<i>CO₂</i>	<i>Indice de maturité</i>	<i>Commentaires</i>
<i>DA (j+5)</i>	6	2	2	frais
<i>DA (j+10)</i>	4	5	5	actif
<i>CC (j+20)</i>	4	4	4	actif
<i>CF (j+20)</i>	4	3	3	très actif

Les résultats des tests Solvita® indiquent une faible progression de la fermentation. Le compost « coarse » atteint une maturité de 4 (compost jeune), en pleine phase de dégradation, très actif et immature. Le résultat du test Solvita® pour le compost « fine » est de 3 (compost très actif), matériel jeune à haut taux de respiration. Ils sont en cours de dégradation par rapport à une échelle de 8 (compost mature). La phase de criblage, séparant la fraction supérieure à 20 mm, semble séparer également une partie de la matière organique dégradée puisque l'indice de maturité Solvita® diminue après cette étape. Cette méthode est de plus en plus employée dans les usines de compostages des P.I [Wang *et al.*, 2004 ; Francou, 2003 ; Changa, *et al.*, 2003 ; Brewer & Sullivan, 2003], seuls quelques exemples sont cités dans la littérature pour le cas des P.E.D. Cette restriction provient certainement d'une méconnaissance du produit et de son coût [Rysk, 2001].

Des tests en vase Dewar ont été également réalisés. Les paramètres : quantité, humidité et tamisage ont été modifiés mais sans succès (pas de montée en température sur les échantillons en début de fermentation). Il semble que cette méthode ne soit pas adaptée aux conditions de cette étude (problème d'échantillonnage), alors que les tests colorimétriques de type Solvita® apportent un renseignement fiable sur l'état de maturité, bien qu'ils soient souvent utilisés simultanément dans la littérature cités précédemment. Les tests par la méthode manométrique alternative de la DBO ont été effectués sur les déchets en fermentation, les résultats sont présentés dans le chapitre 1 de cette partie.

III.4. Tests Cresson

Les tests de germination du cresson ont été réalisés avec 4 réplicats. Le pourcentage moyen est représenté dans le Tableau 54.

Tableau 54 : Moyenne des résultats du test de germination du cresson

<i>Echantillons</i>		<i>% plantules à 2 jours</i>	<i>% plantules à 7 jours</i>
<i>DA J+5</i>	Témoin	61	64
	Compost	0	6
<i>DA J+10</i>	Témoin	68	92
	Compost	0	2
<i>CF</i>	Témoin	24	43
	Compost	0	21
<i>RA</i>	Témoin	46	59
	Compost	0	0

Ces résultats indiquent un retard de germination des plantules lors du procédé de fermentation : l'hygiénisation est en cours. Le compost « fine » présente un retard à la germination dû à l'assimilation plus lente des éléments nutritifs du compost : seulement 21% des graines ont germé au bout de 7 jours. Il présente donc une légère phyto-toxicité due à un manque de maturation du produit.

III.5. Aspect bactériologique des composts

Des analyses de micro-organismes pathogènes ont été effectuées par un laboratoire extérieur (Cf. Tableau 55).

Tableau 55 : Aspect bactériologique du compost et refus de criblage

	<i>CC</i>	<i>CF</i>	<i>RA</i>
<i>Comptage total (cfu / g)</i>	$1,3 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^6$	$3,9 \cdot 10^8$
<i>Coliformes (/ 100 g)</i>	0	0	$4,5 \cdot 10^2$
<i>E.Coli (/ 100 g)</i>	0	0	0
<i>Salmonella (/ 25 g)</i>	Absent	Absent	Absent
<i>Shigella (cfu / g)</i>	0	0	0
<i>Espèces de Listeria (25 g)</i>	Présent	Absent	Présent

Pour tous les échantillons l'absence d'E.Coli et de Shigella est constatée. Le compost « coarse » présente des espèces de listeria et les refus d'affinage des coliformes. Le compost « fine » ne présente aucun de ces agents pathogènes. Ce dernier est donc hygiénisé, confirmant les résultats de la montée en température dans l'andain, suffisante pour une hygiénisation, mais pas pour une bonne dégradation [Rytz, 2001, Mbuligwe *et al.*, 2001].

Le compost n'est pas suffisamment mûr pour une utilisation agricole immédiate d'après les résultats des tests obtenus précédemment ; l'amélioration de la fermentation permettra de le rendre utilisable à cours terme.

III.6. Qualité agronomique des composts produits

Bien que la loi en vigueur ne spécifie pas de s'assurer de la qualité agronomique du compost, ces éléments sont évalués afin de juger de l'apport du compost au sol. Ces éléments sont présentés dans le Tableau 56.

Tableau 56 : Evolution de la qualité agronomique du compost

<i>Paramètres</i>	<i>CC</i>	<i>CF</i>	<i>RA</i>
<i>P (%)</i>	0,37	0,26	0,28
<i>K₂O (%)</i>	0,68	0,73	0,64
<i>CaO (%)</i>	3,00	3,1	3,0
<i>MgO (%)</i>	0,04	0,35	0,33
<i>Na₂O (%)</i>	0,74	0,74	0,77

Les éléments N, P et K sont les nutritifs principaux nécessaires à la production végétale. Sauf besoin spécifique élevé de la part de certaines plantes ou carences marquées du sol, l'apport de ces 3 éléments est généralement suffisant pour couvrir les besoins de fertilisation des cultures. Les composts produits dans le site B sont de qualités agronomiques comparables à ceux produits dans d'autres pays [Enda ; Soumaré *et al*, 2003 ; Soclo, 1999 ; Rytz, 2001 ; Mbuligwe *et al.*, 2001].

La mesure de ces éléments ne remplace pas la validation du bénéfice que le compost apporte aux sols. Pour cela, des essais en champs peuvent être effectués comme ceux effectués par Matjeka (2001) qui montre une augmentation des rendements avec l'utilisation du compost. Même si ces essais sont longs, ils doivent constituer un indicateur dans la méthodologie puisqu'ils sont essentiels pour les débouchés du compost.

IV. Contrôle des lixiviats

Dans la réglementation, aucun contrôle des lixiviats de compostage n'est recommandé. Dans un souci de conformité avec la réglementation en vigueur en France et dans un respect de l'environnement, une analyse du lixiviat a été réalisée et les résultats sont présentés dans le Tableau 57. L'échantillon de lixiviat a été prélevé en fin de procédé (J=18) autour de l'andain de référence. Le débit n'est pas connu, aussi la représentativité de l'échantillon est suspecte. Peu de données sont collectés sur la composition des lixiviats dans les P.E.D, puisqu'ils sont trop rarement collectés pour être traités.

Tableau 57 : Composition du lixiviat

Paramètres	Valeurs	Unités
pH	6,7	U pH
MES	1,8	mg/L
DCO	2,0	g/L
NO₂⁻	9,1	mg/L
NO₃⁻	530	mg/L
PO₄³⁻	397	mg/L
NTK	10,8	g/L
Cu	4,44	mg/L
Cr	4,31	mg/L
Ni	3,67	mg/L
As	0,509	mg/L
Pb	0,596	mg/L
Cd	0,021	mg/L
Fe	271	mg/L

La teneur en DCO est importante, cela peut provenir des interférences avec les ions chlorure, non analysés. La majorité (90%) des éléments métalliques se retrouve dans le compost [Meoun & Le Clerc, 1999]. Les teneurs en métaux lourds sont élevées (Cu, Cr, Ni), ce qui constitue un problème à maîtriser. Mais auparavant, il faudrait réaliser un échantillonnage de lixiviat plus élaboré et un suivi du débit en fonction de la pluviométrie et de l'apport d'eau pendant la fermentation. La réalisation de cet échantillonnage est rendue difficile en raison de la rapide évaporation de l'eau. La quantité pouvant être prélevée est alors faible, remettant en cause sa représentativité mais non son intérêt pour la méthodologie de mesure.

V. Bilan matière sur les opérations unitaires

V.1. Efficacité du tri

Les performances du tri sont exprimées en pourcentage de matière brute du flux correspondant sauf pour la quantité de matière brute exprimée en Kg, résultats présentés dans le Tableau 58. Le nombre de trieurs est fixé à 6 pendant l'essai.

Tableau 58 : Débit matière au niveau du tri

	<i>Catégorie</i>	<i>DB</i>	<i>MT</i>	<i>Flux sortant</i>
<i>Matière brute (Kg)</i>		175911	765	165146
> 100 mm	<i>Fermentescibles</i>	10,7	0,0	10,7
	<i>Papiers-cartons</i>	8,2	0,1	8,1
	<i>Textiles</i>	5,1	0,0	5,1
	<i>Plastiques</i>	6,0	0,1	5,9
	<i>Verre</i>	0,2	0,0	0,2
	<i>Métaux</i>	0,1	0,0	0,1
	<i>Inertes</i>	0,7	0,0	0,7
	<i>Autres</i>	0,8	0,0	0,8
100 à 50 mm	<i>Fermentescibles</i>	6,1	0,0	6,1
	<i>Papiers-cartons</i>	3,8	0,0	3,8
	<i>Textiles</i>	2,5	0,0	2,5
	<i>Plastiques</i>	3,7	0,1	3,6
	<i>Verre</i>	1,3	0,2	1,1
	<i>Métaux</i>	1,2	0,0	1,2
	<i>Inertes</i>	0,2	0,0	0,2
	<i>Autres</i>	0,8	0,0	0,8
50 à 20 mm	<i>Fermentescibles</i>	15,3	0,0	15,3
	<i>Papiers-cartons</i>	2,0	0,0	2,0
	<i>Textiles</i>	0,1	0,0	0,1
	<i>Plastiques</i>	0,6	0,0	0,6
	<i>Verre</i>	0,6	0,0	0,6
	<i>Métaux</i>	0,0	0,0	0,0
	<i>Inertes</i>	0,7	0,0	0,7
	<i>Autres</i>	0,2	0,0	0,2
< 20 mm	<i>Fines</i>	29,1	0,0	29,1

Le tri sépare une faible partie des plastiques, des papiers – cartons et du verre entre 0,1 et 0,2%. Il est limité à moins de 1,5% du flux des déchets urbains. Pour améliorer ce rendement, plusieurs possibilités sont envisageables : augmenter le nombre de trieurs, réduire la vitesse du convoyeur de tri. La question plus fondamentale est la suivante : faut-il maintenir le poste de tri ? Le coût de ce poste dans la chaîne de traitement n'est pas connu mais semble trop élevé par rapport au prix de vente du matériau récupéré. Bien que dans le cas du site B la rentabilité économique du tri ne soit pas établie, les références bibliographiques montrent que souvent dans les P.E.D le tri en amont est préconisé [Dulac, 2001 ; Waas, 1996 ; Zurbrugg, 1996].

V.2. Performance du tube rotatif de maille 55 mm

Les résultats du tube rotatif sont exprimés en Kg de matière brute du flux correspondant et figurent dans le Tableau 59.

Tableau 59 : Débit matière du tube rotatif de type Dano®

	<i>DB</i>	<i>DT</i>	<i>Refus (> 55 mm)</i>	<i>DC</i>
<i>Matière brute (Kg)</i>	175911	173999	109651	64148
<i>> 100 mm</i>	56133	55506	40582	0
<i>100 à 50 mm</i>	34162	32868	21590	1205
<i>50 à 20 mm</i>	34443	34452	10998	10212
<i>< 20 mm</i>	51173	51173	36492	52730
<i>Fermentescibles</i>	56470	56470	14830	6819
<i>Papiers - cartons</i>	24675	24447	3336	205
<i>Textiles</i>	13526	13526	22976	185
<i>Plastiques</i>	18023	17815	21741	961
<i>Verre</i>	3750	3422	1223	753
<i>Métaux</i>	2406	1315	228	119
<i>Inertes</i>	2657	2657	7185	2276
<i>Autres</i>	3230	3174	1657	148
<i>Fines</i>	51173	51172	36476	52682

La perte de matière dans le tube est négligeable : faible temps de séjour des déchets (30 minutes à 1 heure), elle correspond à une évaporation de l'eau. Après le trommel la descente de maille est importante. Les bouteilles en verre sont cassées, puis retrouvées comme impuretés dans le compost. Une faible partie du verre et des métaux est éliminée par le trommel. Les plastiques et les textiles sont souillés dans le tube. Le trommel sépare 63% des déchets de taille supérieure à 55 mm, notamment le textile et les matières plastiques. Ces refus sont composés de 13,6% de fermentescibles et de 33% de fines.

Les cribles, souvent sous dimensionnés, fixent le débit de l'installation. La fraction fine estimée à 20% dès le début du procédé est élevée, augmentant à plus de 70% après le tube. Le crible permet donc une bonne homogénéisation du flux accompagnée d'une forte réduction granulométrique. Ce phénomène est favorable à la fraction fermentescible, mais contre indiqué pour les fractions verre et inertes, qui se cassent puis contaminent le compost. L'homogénéisation doit donc être douce pour limiter la réduction granulométrique des impuretés. Le rendement du tube rotatif semble faible : 63% de rejets sont obtenus avec une perte en matière organique (fermentescibles + fines) proche de 50%, provenant de l'humidité des déchets. Afin d'éviter cette perte en matière organique, une durée de séjour plus importante est préconisée dans le tube soit en diminuant la vitesse de rotation de 10 tr/min vers 1 tr/min soit en augmentant la longueur du tube rotatif de 14 m à 24 m selon les données de la littérature [Haug, 1993] afin de sécher les déchets (H% proche de 40%).

V.3. Importance des poulies magnétiques de déferrailage

Les performances des poulies de déferrailage sont exprimées en Kg de matière brute du flux correspondant et présentées dans le Tableau 60.

Tableau 60 : Débit matière des poulies magnétiques de déferrailage

	<i>Poulie sur tri</i>			<i>Poulie sur refus</i>			
	<i>DB</i>	<i>Flux entrant (sortie tri)</i>	<i>DT</i>	<i>Flux sortant (Fer 1)</i>	<i>Flux entrant (>55 mm)</i>	<i>RC</i>	<i>Flux sortant (Fer 2)</i>
Matière brute (Kg)	175911	175146	173999	1147	109651	109366	285
> 100 mm	56133	55679	55506	172	40582	40575	0
100 à 50 mm	34162	33856	32868	975	21590	21556	29
50 à 20 mm	34443	34451	34452	0	10998	10765	228
< 20 mm	51173	51178	51173	0	36492	36463	29
Métaux	2406	2406	1091	1315	228	8	220

La poulie sur tri retire 45% des ferrailles essentiellement de taille supérieure à 50 mm, mais il en reste encore dans le flux une très faible quantité 0,07% (DB) en fermentation. La seconde poulie sépare la majorité des métaux de taille 20 à 50 mm. Les deux équipements de déferrailage sont efficaces.

Après consultation de l'exploitant, la quantité de métaux séparés lors de l'étude est supérieure à celle obtenue dans les conditions normales de fonctionnement. Cet écart peut provenir du nombre de trieurs fixé à six pour l'étude, mais aussi de l'approvisionnement sur le convoyeur de tri, qui semble moins rapide pour permettre une meilleure répartition en couches fines des déchets. La capacité de séparation des poulies magnétiques est ainsi améliorée.

V.4. Efficacité de la table vibrante de maille 14 mm

Les résultats du tri après la table vibrante sont exprimés en Kg de matière brute et présentés dans le Tableau 61.

Tableau 61 : Débit matière de la table vibrante

	DB	CC	RA	CF
Matière brute (Kg)	175911	39511	24051	15459
> 100 mm	56133	0	0	0
100 à 50 mm	34162	377	376	0
50 à 20 mm	34443	4477	4310	169
< 20 mm	51173	34655	19367	15290
Fermentescibles	56470	2128	2025	88
Papiers cartons	24675	50	46	0
Textiles	13526	185	170	14
Plastiques	18023	962	941	20
Verre	3750	753	739	14
Métaux	2406	112	109	0
Inertes	2657	2043	1998	43
Autres	3230	30	25	0
Fines	51173	33181	18099	15281

L'efficacité du criblage dépend de la qualité de son chargement et de l'humidité du produit, pouvant engendrer un léger colmatage. Une perte voisine de 2% est constatée lors de cette étape par un envol de compost et l'évaporation d'eau.

Le crible a un rendement faible 39% (en poids) en production de compost « fine » or ce genre d'équipement devrait approcher les 50-55%. Un criblage à une maille de 20 mm peut être proposé afin d'améliorer la qualité du compost et de limiter la perte en matière organique dans les refus, d'autant plus que cette granulométrie est souvent proposée aux agriculteurs dans les P.E.D [Matejka *et al.*, 2001]. Les teneurs en plastiques, verres et inertes sont plus faibles après l'affinage dans la fraction granulométrique 20-50 mm.

VI. Préconisations suite à l'étude

Cette étude a permis d'évaluer le réajustement futur des conditions de fonctionnement de la chaîne de compostage. Le Tableau 62 synthétise les commentaires précédemment établis en fonction des indicateurs mesurés.

Tableau 62 : Récapitulatif de l'étude sur le site B

<i>Indicateurs mesurés</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Constat</i>
Taux de traitement de l'usine	9% CF et 14% CC	Faible production de compost
Taux de rejet de l'usine	75% de refus	Forte quantité de refus
Taux de tri	0,4% DB en matériaux triés	Faible efficacité des trieurs
Performance horaire des trieurs	9,2 Kg	
Taux de déferraillage	0,9% DB	Bonne efficacité du système
Performance horaire	71,3 et 17,5 Kg	
Suivi de la granulométrie		Forte réduction dans le tube Légère réduction lors de la fermentation
Taux de fermentescibles dans les refus	RC : 13,5% RA : 8,3%	Taux élevé : problème d'humidité et de qualité de tri
Taux impureté (> 20 mm) dans le compost	CC : 7,4% CF : 0,4%	Taux élevé
Taux de plastique (> 20 mm) dans le compost	CC : 2,4% CF : 0,1%	Taux élevé pour le plastique dans le CC
Densification	Entre DT et CF 54%	En accord avec la granulométrie
Suivi de l'eau		- H% élevée dans les équipements (tube) - H% faible lors de la fermentation (andains)
Suivi des paramètres analytiques		
M.O.T	Suivi	Maturité non atteinte
C/N	Suivi	Maturité non atteinte
NaCl	Suivi	En accord avec la réglementation en vigueur
Cd, Cu, Fe, Pb	Suivi	Concentration dans la chaîne Absence d'analyses de métaux comme As, Cr, Hg.
Inertes	Suivi	Forte quantité dans le compost
Maturité	Suivi	Maturité non atteinte, phyto-toxicité
Valeur agronomique		En accord avec la littérature
Essai agronomique		Absence

Au vu des commentaires du tableau précédent, on peut ainsi proposer des solutions adaptables pour les conditions locales d'exploitation en considérant deux options.

VI.1. Option 1 : optimisation des différentes étapes

Le taux de refus de l'usine, somme de RC et de RA, est de 75% sur brut. Le taux de traitement correspond aux taux des matériaux recyclés et de production de compost est faible, 14% pour le compost « coarse » et 9% pour le compost « fine ». Les quantités de refus doivent diminuer, d'autant plus qu'elles contiennent un fort pourcentage de matières fermentescibles et de fines. Le procédé, à l'état actuel, perd une grande quantité de matière organique dans ses refus. Pour autant, le compost produit est de qualité, mais pas encore assez mûr et présente une phyto-toxicité non négligeable. Des améliorations peuvent être préconisées à différents niveaux :

- Le tri : il peut être maintenu, mais le nombre de trieurs doit être fixe, et suffisant (au moins 6 et la vitesse du tapis convoyeur doit être réduite) pour éliminer le plus de matériaux valorisables. [Zurbrugg, 1996].
- Le tube rotatif : une forte réduction granulométrique est constatée à l'intérieur, mais elle a également comme inconvénient l'apparition de fines impuretés. Le crible sépare une quantité non négligeable de plastiques mais avec elle, une proportion élevée de matière organique est piégée. Un temps de séjour plus long dans le tube permettrait de sécher les déchets et d'éviter ainsi le colmatage du crible. Les procédés de type BRS® ou Dano® préconise un temps de séjour de 3 jours avec une vitesse de rotation de 1 tr/min et une longueur de tube variant de 25 à 45m [Furedy, 2001 ; Haug, 1993 ; www.vinci-environnement.fr]. Un choix de maille plus élevée 60 mm est envisageable afin de limiter la perte de matière organique dans les refus.
- La fermentation en andains : le compost est de qualité agronomique satisfaisante avec une bonne homogénéisation lors de la dégradation mais il n'est pas mature. L'amélioration de sa maturité peut s'effectuer soit par l'allongement de la durée de fermentation, soit par l'augmentation de la teneur de l'humidité à 60% au cours de la dégradation. La fréquence de retournement est un paramètre d'accélération de la dégradation notamment en rapprochant les premiers retournements comme le montre l'étude de Matejka (2001).
- Le crible : le passage du compost dans le crible de maille 14 mm diminue la teneur en plastique et en fragments de verre, il semble néanmoins possible de modifier la taille de maille pour augmenter le rendement de compost fine.

VI.2. Option 2 : propositions de modification de chaîne de traitement

Selon les résultats des essais et le matériel disponible, une nouvelle chaîne de compostage peut-être proposée :

- tri manuel des déchets avec un personnel en nombre suffisant et constant,
- homogénéisation dans le tube, rallongé, mais sans le crible,
- mise en fermentation en andain, avec un maintien de l'humidité à 60%, et des retournements tous les 5 jours,
- criblage à 55 mm, avec renvoi des refus en tête de procédé,
- affinage à 14 mm.

Quelle que soit l'option envisagée, il serait judicieux de montrer l'efficacité du compost sur des parcelles agricoles dans le cadre d'une étude agronomique scientifique présentant des conditions adéquates pour mesurer les impacts de l'utilisation des composts sur les rendements de production, sur les quantités appliquées à l'hectare et sur la préservation des sols par l'absence d'éléments indésirables

par exemple une étude statistique sur blocs aléatoires, une comparaison par rapport à un sol témoin ou avec d'autres amendements organiques, etc.

En conclusion, la mise en œuvre de la méthodologie sur un site de taille industrielle et dans des conditions de fonctionnement normales pour un P.E.D a permis de juger des difficultés d'organisation et de réalisation.

Les performances des indicateurs ont été étudiées tant sur l'aspect de leur mise en œuvre que sur celui de leur pertinence pour évaluer le fonctionnement de l'usine. L'expertise a permis d'établir des bilans massiques de natures diverses : quantités de déchets à chaque étape, notamment des matériaux triés, des catégories de constituants de l'échantillon, de la granulométrie des déchets. Le suivi de la fermentation apporte également des clés pour choisir une voie d'amélioration du procédé. Ces bilans reflètent l'état de fonctionnement de l'usine. Suite à l'identification des indicateurs, un bilan par équipement a été effectué dans le but de synthétiser toutes les données recueillies et de juger de l'efficacité réelle de chacune des étapes du procédé.

Comme pour la première validation de la logique de la méthodologie sur déchets verts, les constatations de cette expertise satisfont à un premier objectif, à savoir, connaître parfaitement le devenir de la matière organique et des polluants, lors du procédé de fabrication du compost. Mais certains manques sont apparus dans la méthodologie ne facilitant pas l'analyse des résultats : le suivi de la fermentation par des mesures de température plus rapprochées, l'absence de pluviomètre ou de station météorologique sur site, le choix des métaux toxiques (As, Hg), un manque de résultats sur des essais en parcelles agricoles pour estimer l'impact de l'application des composts sur les sols et les cultures et une absence de données pour connaître la rentabilité économique de chaque étape.

Chapitre 4 : Proposition d'une méthodologie générale

Si le chapitre précédent a permis d'identifier les principaux paramètres technologiques nécessaires à un compostage durable des déchets urbains à l'échelle industrielle et de préciser les conditions de fonctionnement des usines pour éviter leur fermeture prématurée, il n'en demeure pas moins que la filière compostage dans les P.E.D présente souvent d'autres difficultés. Elles apparaissent en amont du site de compostage au niveau de la collecte des déchets et en aval, au niveau de la valorisation du compost.

Ce dernier chapitre permettra de proposer une méthodologie générale d'expertise et d'évaluation du procédé qui aborde ces deux aspects souvent négligés dans les protocoles d'évaluation du compostage industriel.

La filière globale de compostage des déchets urbains, se décompose en trois phases : la collecte, le tri-compostage et la valorisation du produit. Ces phases sont dépendantes les unes des autres, et le succès de la filière repose sur la prise en compte des paramètres, fixant le flux de déchets (a), la teneur en matières fermentescibles (b), le rendement de production de compost (c) et l'efficacité agronomique du compost (d). Chaque paramètre peut être défini comme suit :

- paramètre a lié aux flux des déchets : la collecte doit être durable, par conséquent il est nécessaire de suivre des indicateurs de collecte : taux de couverture de la collecte, taux de recouvrement de la redevance,
- paramètre b relatif à la teneur en matière fermentescible : tous les déchets urbains ne sont pas compostables dans les mêmes conditions ; la caractérisation des déchets doit être réalisée et leur composition suivie dans le temps : H%, MO%, %inertes, %toxiques,
- paramètre c relatif au rendement de production du compost nécessitant un contrôle du procédé par le biais d'une méthodologie d'expertise servant pour la conception et pour le suivi d'exploitation des installations informelle et industrielle de compostage,
- paramètre d lié à l'efficacité agronomique par des études expérimentales sur parcelles permettant de déterminer en fonction des cultures, les taux d'amendement à l'hectare et les rendements de production. Ce paramètre dépend du type de culture et de la nature du sol.

I. Expertise du procédé technologique de compostage

I.1. Objectifs

Les objectifs de la méthodologie peuvent être classés selon trois niveaux hiérarchiques commençant par des aspects généraux puis se concentrant et ciblant les spécificités des usines, Cf. Tableau 63. Les différents paramètres du procédé de tri-compostage des déchets urbains sont mesurés afin de mettre en évidence d'éventuels dysfonctionnements et d'y apporter des solutions techniques et économiques appropriées et durables.

Tableau 63 : Objectifs de l'expertise

<i>Objectifs</i>	<i>Généraux</i>	<i>Particuliers</i>	<i>Spécifique à l'usine</i>
Types	<ul style="list-style-type: none"> - intégration de la filière compostage dans les schémas directeurs locaux et nationaux - reconnaissance de la filière compostage par la population - élaboration d'un outil d'aide à la décision - appréciation de la méthodologie - création d'une norme ou équivalent 	<ul style="list-style-type: none"> - récupération de la M.O par compostage - amélioration de la qualité du compost - amélioration des rendements de production - gestion des refus 	<ul style="list-style-type: none"> - évaluation des dysfonctionnements - impacts environnementaux (bruit, air, sol...) - NaCl et autres impuretés - formation du personnel

I.2. Planification des actions

Les différentes tâches à réaliser pour l'application de la méthodologie se divisent en trois étapes qui sont la préparation, la réalisation de l'expertise sur site et le bilan de la cette dernière (Figure 41). L'étape de préparation regroupe une phase préalable comprenant les contacts avec les exploitants, les municipalités et les ministères acteurs de la gestion des déchets (ministères de l'environnement et de l'agriculture). Les questionnaires sont envoyés à la fin de cette phase et leur retour permet de débiter la phase suivante de consolidation des relations avec les acteurs locaux, qui aboutira à une mission de préparation permettant d'officialiser et de mettre en forme l'expertise avec les acteurs locaux.

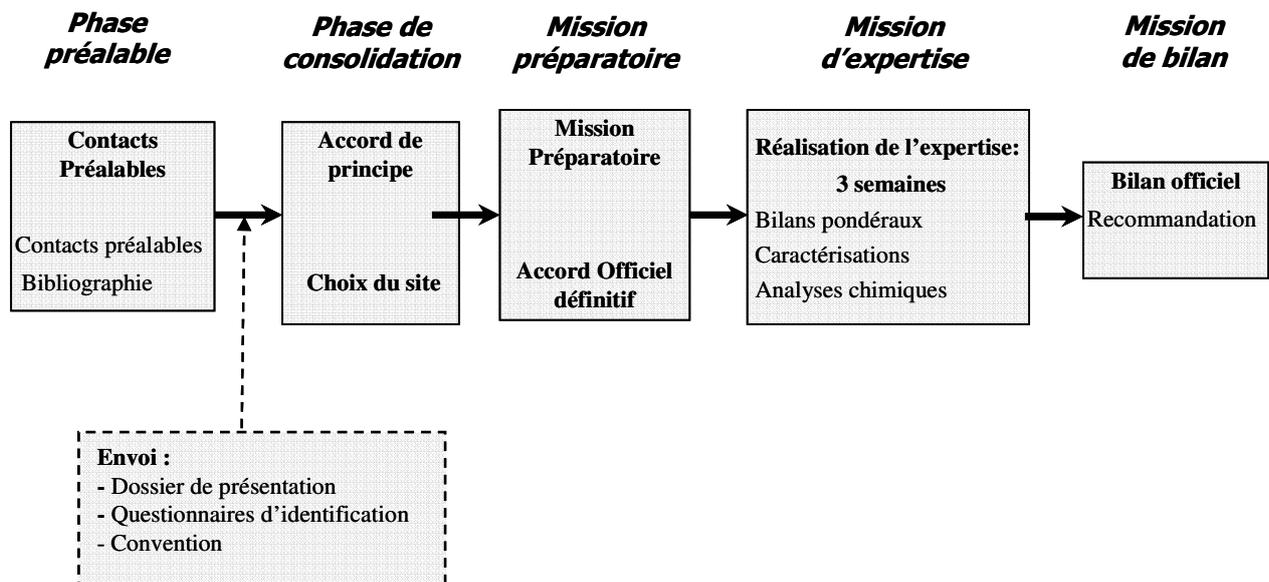


Figure 41 : Schéma de planification des actions

La durée de ces différentes phases dépend de la rapidité des relations avec les acteurs locaux, et celle de la réalisation de l'expertise est fonction de la durée du procédé de compostage. Mais l'intervention doit durer un minimum de trois semaines pour préparer, vérifier les moyens mis en œuvre, réaliser les analyses et former le personnel afin de poursuivre l'analyse des paramètres avec les mêmes méthodes après l'intervention des experts.

I.3. Evaluation technique du procédé

I.3.1. Supports écrits d'expertise

Les deux questionnaires sont nécessaires à la récupération d'informations, le premier permet de recadrer la gestion des déchets dans le contexte national et local et d'y situer la filière compostage. Le

deuxième récapitule la technologie de compostage employé, et les moyens de surveillance et de contrôle du processus de dégradation mis en place.

I.3.2. Schéma du procédé industriel

Un procédé industriel de compostage regroupe plusieurs étapes variant en fonction du type de chaîne de traitement et des usines. Les étapes les plus fréquemment rencontrées sont schématisées dans le Tableau 64.

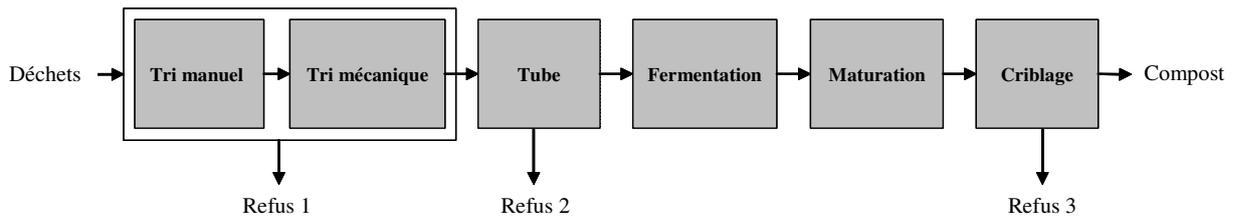


Tableau 64 : Schéma général d'un procédé de compostage

Le tri manuel et le tri mécanique peuvent être regroupés en une seule étape. Le tri mécanique comprend par exemple un crible ou un système de déferrailage ou de séparation de l'aluminium. De même, l'étape du tube et celle du criblage sont à adapter en fonction du procédé de compostage. L'examen des étapes particulières du procédé permet d'identifier des dysfonctionnement précis, indiqués dans le Tableau 65.

Tableau 65 : Identification des évaluations à réaliser pour d'éventuels problèmes

ETAPES	PROBLEMES EVENTUELS	EVALUATION
TRI MANUEL	<ul style="list-style-type: none"> - Elimination des toxiques - Influence de la composition des déchets - Perte de rendement - Efficacité 	<ul style="list-style-type: none"> - Bilan pondéral - Bilan M.O - % Recyclage - Consommation énergétique
TRI MECANIQUE	<ul style="list-style-type: none"> - Positionnement dans la filière - Choix de la maille du crible - Elimination des toxiques - Perte en M.O - Séparation des métaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Bilan pondéral - Bilan MO - Granulométrie - Consommation énergétique
FERMENTATION & MATURATION	<ul style="list-style-type: none"> - Taille des andains - Durée de fermentation - Durée de maturation - Perte en M.O - Montée en température 	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi T, C/N - Bilan M.O - Bilan hydrique - Granulométrie - Fréquence des retournements - Bilan pondéral - Consommation énergétique
CRIBLAGE	<ul style="list-style-type: none"> - Granulométrie - Elimination des toxiques - Positionnement du criblage - choix de la maille du crible 	<ul style="list-style-type: none"> - % Compost - Bilan pondéral - Bilan M.O - Analyse de la valeur agronomique - Consommation énergétique

Ces points souvent délicats sont évalués par des bilans pondéraux, des caractérisations, des bilans hydriques et des analyses physico-chimiques, précisés ci-après.

I.3.3. Bilans pondéraux

La réalisation de bilans pondéraux au cours du procédé de compostage permet de suivre la matière organique, le pourcentage de recyclables, le pourcentage d'impuretés et également celui des toxiques (Figure 42). Le suivi de l'eau est également nécessaire.

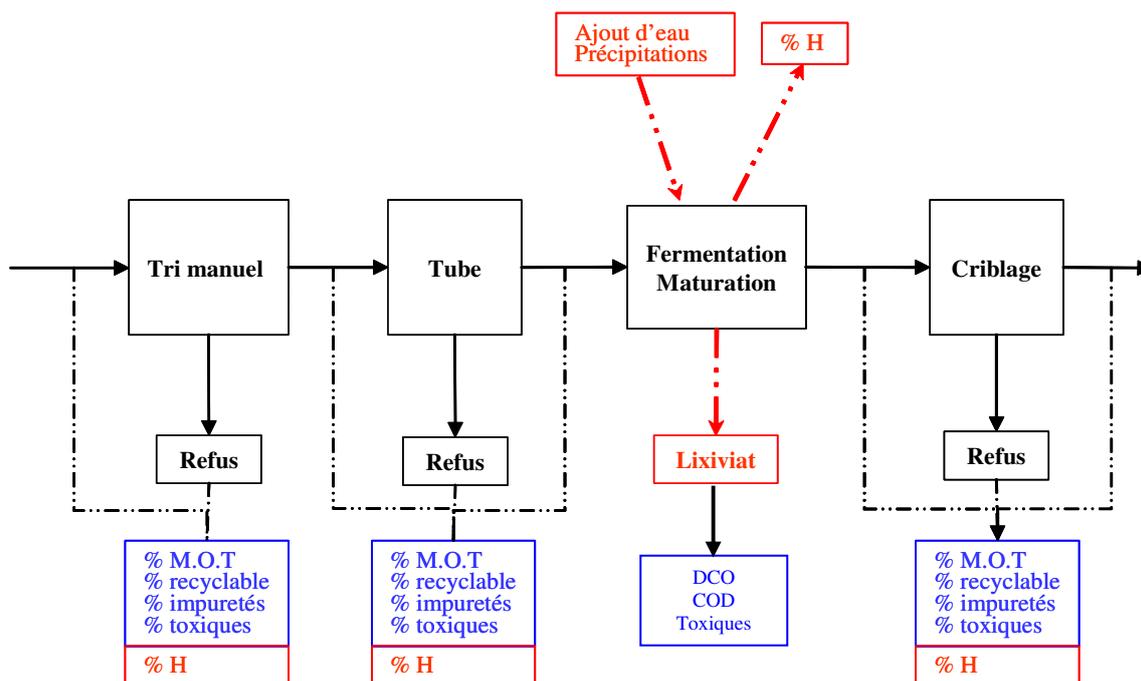


Figure 42 : Bilans pondéraux sur une usine type

La réalisation de bilan massique met en évidence le taux de traitement et le taux de rejet de l'usine. Ces indicateurs sont les plus simples à évaluer, pour juger de la **productivité** de l'usine. Au-delà de la productivité, les bilans massiques relatifs aux matériaux séparés mettent également en évidence les performances des équipements ou du personnel.

I.3.4. Echantillonnage

La réalisation de caractérisation des échantillons de déchets ou de compost est délicate et les conditions de prélèvement doivent être rigoureuses, elles sont décrites dans le Tableau 66.

Tableau 66 : Poids d'échantillons à prélever et séchage à réaliser

Type	Quantité à analyser		Séchage	Identification	Observation
	humide	sec			
Déchets bruts	500	100	A l'air	X	Séchage alternatif à 80°C en étuve (de 1 m ³) Prélèvements en continus modifiables en fonction des conditions
Tri manuel					
Flux	100	70	A l'air	X	Séchage alternatif à 80°C en étuve (de 1 m ³) Prélèvements en continus modifiables en fonction des conditions
Matériaux	-	-			
Tube					
Flux	100	50	A l'air	X	Séchage alternatif à 80°C en étuve (de 1 m ³) Prélèvements en continus modifiables en fonction des conditions
Refus	100				
Andains fermentés	50	50	A l'air	X	Séchage alternatif à 80°C en étuve (de 1 m ³) Prélèvements en continus modifiables en fonction des conditions
Andains maturés	50	50	A l'air	X	Séchage alternatif à 80°C en étuve (de 1 m ³) Prélèvements en continus modifiables en fonction des conditions
Criblage					
Compost	25	50	A l'air	X	Séchage alternatif à 80°C en étuve (de 1 m ³) Prélèvements en continus modifiables en fonction des conditions
Refus	25	50			

* à définir selon le procédé

Les analyses physico-chimiques de laboratoire sont réalisées sur des prélèvements provenant de la caractérisation. Un échantillon de déchets doit être prélevé à chaque étape en continu afin de lisser les erreurs de prélèvements sauf pour les déchets mis en andains, où les prélèvements sont effectués à différentes profondeurs et en plusieurs points de l'andain afin de recueillir un échantillon représentatif. La quantité de déchets à prélever est dégressive avec l'homogénéisation du substrat et l'avancement du procédé. Pour la caractérisation sur sec, la quantité d'échantillons à prélever dépend de l'humidité du déchet.

Les échantillons doivent être conservés à l'abri de la lumière et si possible à une température la plus proche possible de 4°C, or étant donné le nombre important d'échantillons et leur volume, leur conservation au réfrigérateur est difficile, une pièce climatisée peut alors servir à une température voisine de 20°C.

L'identification de tous les échantillons est essentielle et doit être spécifique au procédé de chaque usine, celle employée dans l'étude du cas B peut servir d'exemple (Cf. partie 3, chapitre 1 cahiers d'analyses) :

XYa, n₁-n_z, C_i

Avec

- XY : l'origine du déchet

- a : le type de caractérisation sur sec (s) ou sur humide (h)
- n_1-n_z : l'intervalle de maille du crible lors de la caractérisation
- Ci : Catégorie de constituants

I.3.5. Caractérisation

La caractérisation comprend la granulométrie et le classement par catégorie des constituants des déchets. Les dimensions des mailles pour la séparation granulométrique sont 100, 50 et 20 mm. Ce sont les plus communément utilisées mais elles doivent être adaptées en fonction du procédé de compostage, Tableau 67.

Tableau 67 : Types de caractérisation

CARACTERISATION		
GRANULOMETRIE	Justifications	CATEGORISATION Catégories
>100 mm 100-50 mm 50-20 mm <20 mm	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement en M.O - Impuretés dans compost + produit valorisable - Toxique dans compost + produit valorisable - Matières valorisables - Composition des déchets - Impuretés dans compost 	<ul style="list-style-type: none"> - Fermentescibles - Plastiques en mélange ou non - Verres - Inertes - Métaux différenciés ou non - Papiers-cartons différenciés ou non - Textiles - Fines
<u>Commentaire</u> : la taille des mailles est fonction du procédé		<u>Commentaire</u> : le nombre de catégories dépend de la composition des déchets urbains

Les résultats obtenus pour les caractérisations sur humide ou sur sec montrent un écart dû à la matière organique fortement chargée en humidité. L'erreur liée au séchage des échantillons compense sans doute celle de la représentativité. La caractérisation sur humide fait un premier bilan, une première approche. Ensuite une caractérisation sur sec permet d'avoir le détail de fonctionnement par s équipement. La caractérisation sur humide est retenue pour sa facilité de mise en œuvre dans les P.E.D car elle ne nécessite pas de séchage et reflète la réalité du procédé, tandis que la caractérisation sur sec révèle la composition et la granulométrie de l'échantillon à chaque étape et facilite la phase de séparation. Le suivi de la granulométrie permet de vérifier le déroulement du processus de dégradation et le dimensionnement des équipements.

I.3.6. Analyse des paramètres de suivi du procédé

I.3.6.1. Paramètres physiques

Les paramètres physiques évalués sont la densité, la température, l'humidité et les facteurs climatiques intervenant directement sur le procédé comme les précipitations et l'évaporation de l'eau, Cf. Tableau 68.

Tableau 68 : Paramètres physiques à mesurer pendant l'expertise

<i>Paramètres</i>	<i>Mesure</i>	<i>Unité</i>	<i>Mesure</i>		<i>Méthode</i>	<i>Commentaires</i>
			<i>quand</i>	<i>où</i>	<i>normée</i>	
Densité		Kg/L m ³ /T	Immédiate	s/place		Prise de volume suffisant
Température	Temp	°C	Immédiate	s/place	X	Moyenne de 6 à 8 valeurs, tous les 2 jours
Humidité	H%	%	Immédiate	s/place	X	Séchage à 105°C, à 80°C ou à l'air en fonction de l'analyse
Précipitations	P	mm	Immédiate	s/place		Installation d'un pluviomètre ou
Evaporation	ETR	mm	Immédiate	s/place		d'une station météo

L'évaluation de la densité fait apparaître quelques difficultés au niveau de la méthodologie notamment pour les déchets bruts très hétérogènes. Si la connaissance de la densité des déchets produits par les ménages est indispensable pour le dimensionnement de la collecte, pendant le déroulement du procédé, cette mesure est utile pour l'évaluation du bilan massique sur les andains.

Le suivi de l'humidité fournit deux indications, dont la première est relative aux performances dans le fonctionnement des équipements et la seconde à l'optimisation du processus de dégradation. Le pourcentage d'humidité en début de processus de dégradation est recommandée proche de 60% pour les déchets ménagers, puis son maintien lors de la fermentation autour de 50 et 60% afin d'améliorer les conditions de dégradation des micro-organismes. Peu d'usines possèdent des stations météorologiques sur site, alors que le bilan hydrique dépend de ces paramètres nécessaires à l'évaluation dès lors l'installation d'un pluviomètre est recommandée.

I.3.6.2. Paramètres chimiques sur solide

Les paramètres chimiques mesurés sur les solides sont le pH, la M.O.T, le rapport C/N, les métaux et le sel NaCl, Tableau 69. Ces analyses peuvent être réalisées sur place dans l'enceinte de l'usine ou par le biais d'un laboratoire extérieur.

Tableau 69 : Paramètres chimiques à mesurer sur solide pendant l'expertise

<i>Paramètres sur solides</i>	<i>Mesure</i>	<i>Unité</i>	<i>Mesure</i>		<i>Méthode normée</i>	<i>Commentaires</i>
			<i>quand</i>	<i>où</i>		
<i>Acidité/alcalinité</i>	pH	u.pH	Immédiate	s/place	X	Mise en solution
<i>M.O.T</i>	M.O.T	%	3 jours max	laboratoire	X	Perte au feu
<i>Carbone</i>	C	%	3 jours max	laboratoire	X	
<i>Azote</i>	N	%	3 jours max	laboratoire	X	
<i>Rapport C/N</i>	C/N					
<i>Métaux</i>	As	mg/Kg	Plusieurs jours	laboratoire	X	Mesure sur déchets brut et en cours de dégradation et sur compost
	Cd					
	Cr					
	Cu		7 jours max	laboratoire		
	Fe		Après minéralisation			
	Ni					
	Pb					
	Hg					
<i>Autres</i>	<i>sel</i>	NaCl	Plusieurs jours	laboratoire	X	Mesure sur compost

Ces analyses chimiques sont effectuées par un laboratoire sur place ou extérieur sauf pour la mesure du pH, qui peut être effectuée sur place. Le rapport M.O.T/C peut également être suivi et doit être comprise entre 1,8 et 2 pour un compost mature. Cette valeur est employée bien souvent comme approximation pour évaluer la valeur du carbone. Certaines analyses peuvent être réalisées par des méthodes alternatives par exemple les mallettes de terrain pour réaliser le pH, la conductivité, l'azote total.

I.3.6.3. Paramètres chimiques sur lixiviat

La composition du lixiviat est essentielle pour en établir un suivi complet des paramètres (Tableau 70) et le bilan hydrique.

Tableau 70 : Paramètres chimiques sur les lixiviats

<i>Paramètres sur lixiviat</i>	<i>Mesure</i>	<i>Unité</i>	<i>Mesure quand</i>	<i>Mesure où</i>	<i>Méthode normée</i>	<i>Commentaires</i>
<i>Acidité alcalinité</i>	/ pH	u.pH	Immédiate	s/place	X	
<i>Matière organique</i>	DCO DBO ₅ Abs UV	mg O ₂ /L mg O ₂ /L u abs	2 jours max	laboratoire	X	Méthodes alternatives spectrométriques à la mallette de terrain
<i>Carbone</i>	COD	mg C/L	2 jours max	laboratoire	X	Méthodes alternatives spectrométriques à la mallette de terrain
<i>Azote</i>	NTK NH ₄ ⁺		2 jours max	laboratoire	X	Méthodes alternatives spectrométriques à la mallette de terrain
<i>Bio-dégradabilité</i>	DBO ₅ /D CO		2 jours max	sur place laboratoire		Méthodes alternatives spectrométriques à la mallette de terrain
<i>Métaux</i>	As Cd Cr Cu Fe Ni Pb Hg	mg/Kg	Plusieurs jours Avant minéralisation	laboratoire	X	Méthodes alternatives spectrométriques à la mallette de terrain
<i>Autres</i>	<i>sel</i> NaCl	mg/Kg			X	

La majorité des paramètres chimiques évalués dans le lixiviat requiert des méthodes analytiques précises mais souvent complexes à mettre en oeuvre et proposées par des laboratoires extérieurs seulement. Des analyses spectrométriques de terrain de type Dr Lange® ou HACH® peuvent être employées comme solution alternative.

I.3.6.4. Analyse du compost

L'estimation de la qualité du compost est indispensable puisqu'il est l'aboutissement de la chaîne de traitements. Des contrôles sont donc essentiels afin de s'assurer de sa valeur agronomique et de son caractère inoffensif pour les sols et les cultures, pour cela cinq critères sont suivis (Tableau 71).

Tableau 71 : Paramètres chimiques mesurés sur le compost pendant l'expertise

<i>Maturité</i>	<i>unité</i>	<i>Mesure</i>		<i>Norme</i>	<i>Commentaires</i>
		<i>quand</i>	<i>où</i>		
Respirométrie		Immédiat	sur site	Recommandée	DBO à valider
DBO	mgO ₂ /Kg				
Solvita®	ms				
Rapport C/N		Immédiat	laboratoire	X	
Auto-échauffement	°C	Immédiat	sur site	X	
<i>Inertes</i>					
Test des inertes	%	Immédiat	sur site	X	
<i>Fertilité</i>					
N, P ₂ O ₅ , K ₂ O, CaO, MgO	%	3 jours max	laboratoire	X	
<i>Toxicité</i>					
Test de germination du cresson	Nb plantules	Immédiat	sur site	X	Réalisable avec un sol de culture
Métaux	As Cd Cr Cu Fe Ni Pb Hg	Plusieurs jours Avant minéralisation	laboratoire	X	Analyses coûteuses
<i>Innocuité</i>					
<i>Coliformes</i>	/ 100 g	Immédiat	laboratoire		Prendre des
<i>E.Coli</i>	/ 100 g	Immédiat	laboratoire		précautions lors
<i>Salmonella</i>	/ 25 g	Immédiat	laboratoire		des prélèvements
<i>Shigella</i>	cfu / g	Immédiat	laboratoire		(matériels stérils)
<i>Espèces de Listeria</i>	/ 25 g	Immédiat	laboratoire		

La teneur en sel NaCl sera éventuellement suivie avec plus de précision si un dysfonctionnement apparaît. L'analyse des inertes permet de connaître la composition de la fraction la plus fine. Elle est préconisée lors d'une caractérisation de la fraction < fines < 20 mm, l'identification de cette dernière est essentielle, bien que la mise en œuvre soit délicate dans les P.E.D. Connaître la quantité de métaux et leur cheminement à travers la chaîne de traitement est primordial, puisqu'ils représentent une source de pollution pour le compost. Le suivi et l'analyse des éléments métalliques toxiques sont essentiels à considérer et à évaluer.

I.3.7. Indicateurs de performance

L'application de la méthodologie sur 2 sites et son analyse a permis d'identifier des indicateurs de performance (Tableau 72) pour évaluer le fonctionnement de l'usine.

Tableau 72 : Indicateurs de performance

<i>Indicateurs</i>	<i>Objectifs</i>	<i>Méthodes Analytiques</i>
Taux de traitement de l'usine	Productivité de l'usine (T/J)	Bilan pondéral
Taux de rejet de l'usine	Productivité de l'usine (T/J)	Bilan pondéral
Taux de tri	Efficacité du tri	Bilan pondéral
Taux de déferrailage	Efficacité du déferrailage	Bilan pondéral
Suivi de la granulométrie	Adéquation maille	Caractérisation
Taux de fermentescibles dans les refus	Suivi de la perte en M.O	Caractérisation
Taux d'impuretés, de plastiques (< 20 mm) dans le compost	Qualité du compost	Analyse des inertes
Densification	Adéquation avec la fermentation	Densité, granulométrie
Suivi de l'humidité	Efficacité des équipements Performance de la dégradation	H%
Maturité du compost	Performance de la dégradation	M.O.T ; C/N, Température, Solvita®, DBO
Fertilité	Qualité du compost	N, P ₂ O ₅ , K ₂ O, CaO, MgO
Toxicité	Qualité du compost	Métaux lourds, tests phyto-toxiques
Aspect microbiologique	Qualité du compost	Comptage de micro-organismes

I.4. Déroulement de l'expertise

I.4.1. Sélection du nombre de personnels nécessaires

A chaque étape du procédé de compostage des analyses sont réalisées, nécessitant du personnel et du temps. Le Tableau 73 donne à titre d'indication un exemple de personnel et de temps indispensable à la réalisation de chaque analyse, mais ces besoins sont également fonction de la quantité de l'échantillon à traiter et de la complexité des déchets à trier.

Tableau 73 : Besoin en personnel et en temps

	<i>Personnel</i>	<i>Temps</i>
Echantillonnage	2	2 h/personne/étape
Bilans pondéraux	2	1 h/ personne/étape
Caractérisations	4	6 h/ personne/étape caractérisation
Analyses physiques	1	1 h/ personne/étape
Analyses chimiques	2	8 h/ personne/étape

I.4.2. Choix du jour de démarrage

Le jour de démarrage doit correspondre à une journée habituelle : il faut tenir compte du temps écoulé entre la production des déchets et leur arrivée sur le site afin de s'affranchir de déchets exceptionnels provenant de jours fériés ou festifs. De même en fonction des jours ouvrables, l'étude

doit débiter suffisamment tôt dans la semaine pour l'envoi des échantillons dans les meilleurs délais aux laboratoires d'analyses.

I.4.3. Choix du flux initial

Le flux initial doit être représentatif de la collecte journalière arrivant sur le site tant en terme de quantité que de composition des déchets. D'autres conditions de réalisation de l'expertise doivent également être prises en compte comme la durée de traitement dans la chaîne.

I.4.4. Sélection des laboratoires extérieurs

Les laboratoires d'analyses sont contactés dans la phase de consolidation ou celle de la pré-mission. Les modalités de réalisation des analyses (protocoles, tarifs et délais) sont ensuite arrêtées

I.5. Fin de l'expertise : bilan et recommandations

La totalité des résultats et leur synthèse sont regroupés dans un cahier de recommandations, qui sera fourni aux exploitants et aux acteurs de la gestion des déchets ayant participé à l'étude. L'analyse des informations et des constatations établies lors de l'expertise aboutit à des préconisations pour améliorer le procédé de compostage et à des propositions de transformations.

II. Amont de l'usine : la collecte

Les indicateurs de collecte sont étudiés pour le cas de la ville du site C (Cf. partie II, chapitre 2 mise en place des outils d'évaluation et descriptions des sites d'étude), site de compostage informel, alimenté par les déchets collectés par une petite entreprise. Les informations recueillies, entre mai 2002 création de l'entreprise et juillet 2003 date de fin de l'étude, permet d'évaluer la collecte en faisant ressortir les meilleurs indicateurs de collecte.

Les paramètres a et b relatifs au flux de déchets et à leur composition sont indispensables à contrôler pour assurer la pérennité de l'alimentation de l'usine de compostage.

II.1. Indicateurs de collecte

La collecte a vu croître très fortement ses abonnés au début de l'activité, puis cette progression s'est ralentie depuis août 2002. Les principaux indicateurs de gestion de la collecte sont indiqués dans le Tableau 74.

Tableau 74 : Indicateurs de collecte du site A

		2002										2003				
		M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J
Nb d'abonnés réels		117	202	245	255	262	267	287	294	298	318	320	327	353	367	367
Taux d'abonnement (%)		9,8	16,9	20,5	21,3	21,9	22,3	24,0	24,5	24,9	26,5	26,7	27,3	29,5	30,6	30,6
Nb de bennes collectées		33	38	41	40	35	35	33	35	37	39	41	42	42	40	42
Qté déchets collectés (T)		69,3	79,8	86,1	84	73,5	73,5	69,3	73,5	77,7	81,9	86,1	88,2	88,2	84	88,2
Taux (%) de couverture		69,4	79,9	86,2	84,1	73,6	73,6	69,4	73,6	77,8	82,0	86,2	88,3	88,3	84,1	88,3

Le **nombre d'abonnés réels** correspond au nombre effectif de ménages abonnés. Il est à opposer avec le nombre d'abonnés potentiels, correspondant à la totalité des ménages dans les quartiers collectés soit 1 198 ménages. Le **taux d'abonnement** se calcule selon la formule suivante : $(\text{Nombre d'abonnés potentiels} / \text{Nombre d'abonnés réels}) * 100$. Après un an de fonctionnement de l'entreprise, seulement 30% des ménages ont accepté de s'abonner. La **quantité de déchets potentiels** correspond à la production de déchets par la totalité des ménages, qui est de 0,4 Kg/hab./jour. Chaque ménage compte en moyenne 7 personnes soit $7 * 0,4 = 2,8$ Kg/ménage/jour ou 84 Kg/ménage/mois. La quantité potentielle de déchets est alors de $84 * 1\ 198 = 100\ 632$ Kg/mois soit 100 T/mois. Ce chiffre est à comparer avec la **quantité de déchets collectés** se calculant par le nombre de bennes arrivant à la décharge dont la contenance est 7 m³. Elle peut être exprimée en tonnes (densité voisine de 0,3). Le **taux de couverture** s'obtient en faisant le rapport entre la quantité de déchets potentiels et la quantité de déchets collectés.

II.2. Analyse des performances

Les performances de l'entreprise sont satisfaisantes en matière de collecte. Bien que seulement 30% de la population soient abonnés, l'entreprise collecte entre 70 et 90% des déchets urbains produits dans les quartiers concernés. Cette constatation appuie l'efficacité de l'entreprise, prête à assumer une augmentation du nombre d'abonnés, puisqu'elle prend déjà en charge la quasi-totalité des déchets produits dans ces quartiers. Si ce taux élevé de collecte révèle l'efficacité technique de l'entreprise, il met en avant également le problème des dépositaires **clandestins**. Le dépôt abusif représente une part considérable, calculable, participant aux déficits de l'entreprise. Sachant qu'il y a 367 ménages dans les quartiers desservis, la production mensuelle de déchets à amener à la décharge devrait être d'environ 31 T/mois, or elle est largement supérieure 79,8 T, l'apport clandestin représente donc 61%.

Le bilan des dépenses entre mai 2002 et juillet 2003 montre que 80% des dépenses sont attribuables à la masse salariale. La maintenance et les réparations des équipements ne représentent que 10% des coûts de la collecte. La Figure 43 indique le bilan financier des activités de la période étudiée.

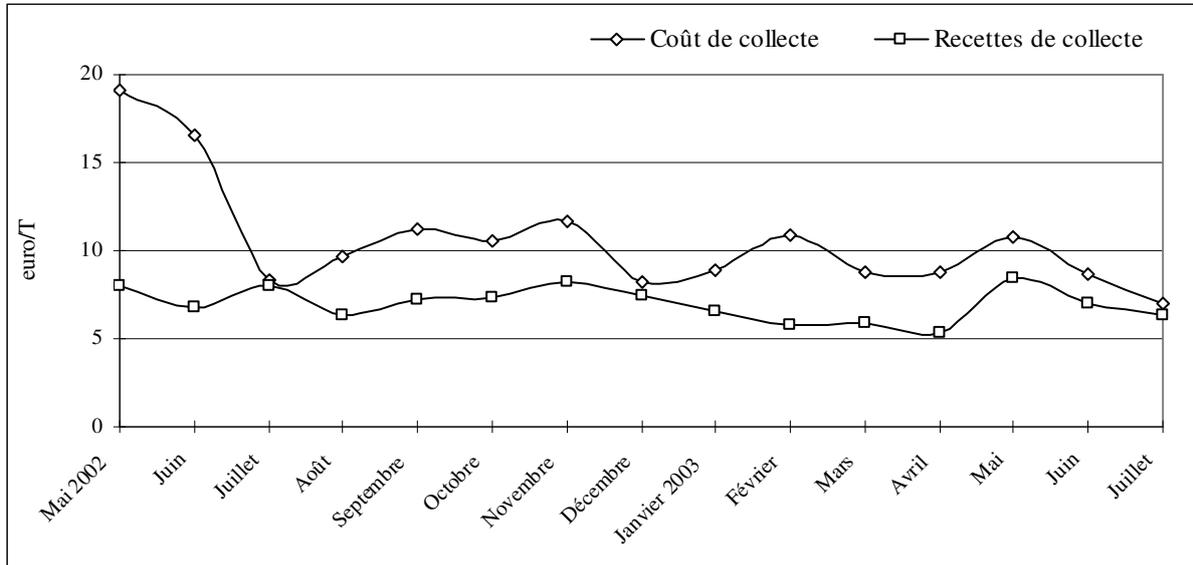


Figure 43 : Rentabilité de l'activité de collecte de la ville C

Le **coût de la collecte** est toujours supérieur aux **recettes**. L'écart entre ces deux indicateurs est justifié les 2 premiers mois d'existence de l'entreprise, où les investissements et la remise en état des équipements sont nécessaires et coûteux.

Bien que l'entreprise soit performante sur le plan technique, certaines déficiences ressortent notamment au niveau du nombre d'abonnés. Le **taux d'abonnement** augmente lentement depuis août 2002, alors que les quantités de déchets collectés sont toujours largement supérieures montrant deux dysfonctionnements, le premier est le faible nombre d'abonnés, à cause d'un manque d'information et de sensibilisation ; pour relancer les abonnements une campagne de sensibilisation auprès des associations de quartiers ou sur les ondes radio est envisageable. Le deuxième problème soulevé par la différence entre le taux de couverture de la collecte et le taux d'abonnement est l'importance des dépôts clandestins. L'entreprise gère la quantité de déchets collectés en surplus sans trop de difficultés, par contre l'état du matériel se dégrade vite, d'autant plus qu'il est très sollicité. Ce phénomène est accentué par le fait que le matériel employé, qui n'est pas si ancien, a été mal entretenu et se retrouve dans un état de délabrement avancé.

La gestion financière des entreprises est un point crucial et montre que dans le cas du site C, le bilan financier est négatif puisque la société n'a jamais fonctionné en créditrice depuis sa création. Des bilans mensuels permettent d'identifier les difficultés rencontrées au cours du mois et d'anticiper

pour les mois suivants. Le manque de prévision et l'accumulation de ces difficultés ont conduit l'entreprise à une situation délicate avec, par exemple, des réserves pour le paiement des salariés. Pour stabiliser le bilan financier, les recettes doivent augmenter comme le nombre d'abonnés. La redevance mensuelle réclamée aux abonnés représente environ 1% du budget familial, ce qui est un taux habituellement retrouvé dans les P.E.D [Zurbrugg, 1999]. Une augmentation de cette redevance n'est pas pour l'instant envisageable.

L'étude du système de collecte des déchets illustre les dysfonctionnements rencontrés au niveau des villes des P.E.D :

- les difficultés relationnelles entre les différents acteurs, qui ont arrêté la collecte des déchets en 2001. La municipalité ayant la volonté de s'investir et de conserver un pouvoir décisionnel au sein du système de gestion des déchets a eu quelques désaccords avec l'O.N.G, en charge du ramassage des déchets. Elle a ensuite fait appel à une entreprise.
- le manque de sensibilisation et d'information de la population. Peu d'habitants de la ville C connaissent le mode de fonctionnement de la collecte et les tarifs appliqués. L'éducation de la population est également un point essentiel afin de réduire les dépôts clandestins.
- le manque de formation en gestion d'entreprise et en gestion financière des dirigeants du secteur privé. La culture sociale est différente de celles des P.I, il n'existe pas ce souci de pérennisation de l'entreprise et de « lendemain sûr ». Les responsables de l'entreprise n'ont jamais effectué de bilan financier avant cette étude.

III. Aval de l'usine : la valorisation du compost

La qualité et les quantités produites doivent être, d'une part, en accord avec la législation, et d'autre part, en harmonie avec les exigences des utilisateurs, avec la capacité du marché et la concurrence.

III.1. Utilisation du compost : marché traditionnel ou marché de rente

L'identification du marché du compost permet de cibler la quantité de produit et sa qualité en fonction des demandes des principaux utilisateurs [Bionet, 2002, Zurbrugg, 2003 b]. Cependant une remarque s'impose concernant le compostage industriel (fixé à au moins 100 tonnes de déchets/jour) compte tenu des quantités de compost produit le seul marché potentiel dans les P.E.D est celui des grandes cultures, du maraîchage ou de la sylviculture (marché traditionnel ou « volume market » d'après la définition donnée par Zurbrugg (2001)) qui permet d'écouler du compost de différentes qualités granulométriques. Le marché de rente (« dollar market ») ne permettant d'écouler que de faibles quantités de compost est réservé à des usages très spécifiques.

La qualité du compost produit dans les usines de compostage industriel ou informel, doit respecter les principales normes réglementaires, en termes d'apport organique, de pureté, d'innocuité, vérifiés par les différentes analyses du compost en fin de chaîne (%M.O.T, %inertes, métaux lourds, test de type Solvita®, cresson etc..). Elle doit être adaptée en terme de granulométrie, de teneurs en fertilisants à son usage agricole [Compost Council of Canada].

Pour cela, des études sur les débouchés et sur le potentiel du marché sont indispensables lors de la construction de l'usine ou de sa réhabilitation [Grosman, 2004], mais aussi des essais sur parcelles agricoles d'amendement de compost produit. En outre ces essais s'insèrent parfaitement dans le cadre de la promotion de la filière compostage dans la gestion des déchets de la ville qui nécessite une campagne de sensibilisation, d'information et de communication pour une image positive du compost auprès de la population et des utilisateurs.

III.2. Données agro-pédologiques locales

III.2.1. Besoins dans la région de la ville C

Les besoins en apports fertilisants ont été évalués, ils sont données dans le Tableau 75 :

Tableau 75 : Besoins en fertilisants dans la région

<i>Quantité en T / préfecture</i>		<i>N</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>K₂O</i>
Besoins	Cultures	958	560	510
	Engrais	9	9	9
Apports	Bouse	106	78	105
	Total	115	87	115
Bilan		-843	-473	-395
Couverture des besoins		12%	16%	22%

III.2.2. Types de sols

On distingue cinq grands types de sols dans la région, avec une forte corrélation sol / topographie. En voici les appellations vernaculaires utilisées par les paysans:

- *Sols Bowal*: il s'agit d'un sol squelettique sur cuirasse. L'érosion en a dégagé les éléments fins et seuls restent quelques centimètres d'un pseudo-sol de gravillons. Ce sol est totalement incultivable, mais son couvert végétal, constitué de quelques arbres et de graminées, fait qu'il est utilisé pour le pâturage.
- *Sols hansanghérés*: ce sont des sols profonds, sur pente moyenne, très meubles et légers. Les matériaux en sont très hétérogènes, des plus fines poussières à d'énormes blocs de dolérite ou de grès, en passant par tous les calibres de graviers. Ils sont non mécanisables du fait de leur pierrosité. Le

travail se fait à la daba (houe). L'eau s'y infiltre très bien et moyennant un temps de jachère suffisamment long, ce sont les sols les plus fertiles (d'après les paysans et les rendements obtenus).

- *Sols dantari*: ce sont des sols alluviaux, formés par accumulation de matériaux à la base des pentes. Ils sont limoneux à sablo-limoneux. On les trouve dans les zones à topographie plane (partie basse des plaines, surface subhorizontale des versants). Leur épaisseur est variable, leur couleur rouge ou grise. Leur lessivage est avancé et leur pauvreté chimique marquée. Ces sols sont pauvres en matière organique et la jachère y reste souvent herbeuse. En saison humide les pluies y pénètrent très mal et on y observe une forte érosion par les eaux de ruissellement.

- *Dunkirés* : on les trouve aux abords des rivières et des fleuves. Les alluvions entassées y forment des sols variés, épais, meubles, légers et toujours bien humides. La texture est limono-argileuse. Ils sont soumis à une inondation périodique et sont très profonds et fertiles. On les cultive toute l'année, moyennant une bonne maîtrise de l'eau et l'apport d'éléments fertilisants.

- *Parawal* : il s'apparente aux Dunkiré. Ce sont des sols d'alluvions fines, limono-argileux et à hydromorphie temporaire. Il présente de bonnes aptitudes culturales.

III.2.3. Caractérisation des cultures

Les trois grands types de cultures testés sont les suivantes (Cf. Tableau 76)

Tableau 76 : Types de cultures

<i>Nom de l'espèce</i>	<i>Pomme-de-terre</i>		<i>Haricot</i>		<i>Maïs grain</i>	
<i>Nom de la variété</i>	Nicolas				Early	
<i>Origine de la semence</i>	Fédération de Timbimadina				Origine américaine, importée d'Israël	
<i>Période de semis</i>	Début des saisons des pluies = début mai					
<i>Durée du cycle végétatif</i>	2,5 à 3 mois		2,5 à 3 mois		4 mois	
<i>Rendement moyen</i>	15 T/ha		1 T/ha		3 à 4 T/ha	
<i>Ecartements entre pieds</i>	65 cm		50 cm		85 cm	
<i>Interligne</i>	50 cm		50 cm		50 cm	
<i>Sensibilité aux termites</i>	Moyenne		Moyenne		Moyenne	
<i>Maladies courantes</i>	Dégénérescence due à de vieilles semences, Flétrissement si excès de pluie,		Pourriture du collet en cas d'excès de pluie		Larves de noctuelles, Rouille, surtout sur les anciennes variétés	
<i>Traitements phytosanitaires</i>	Termicide Ophtanol, granulé)	(Oncol, bazidine	Termicide Ophtanol, granulé)	(Oncol, bazidine + anti- noctuelles	Termicide Ophtanol, granulé)	(Oncol, bazidine

III.3. Essais sur parcelles agricoles

Peu d'essai en champs sont réalisés d'une manière générale [Francou, 2003] et d'autant plus dans les P.E.D [Dalzell *et al.*, 1988], mais dans le cadre d'une étude précédent cette recherche, les qualités agronomiques et le bénéfice du compost produit sur le site C ont été vérifiés.

Afin que les essais soient significatifs, deux conditions doivent être respectées la première concerne le traitement qui doit être répété au cours du temps et la seconde l'emplacement des essais sur le terrain qui doit être tiré au sort. Ces deux conditions sont nécessaires et suffisantes [Lecompt, 1965]. La répartition des traitements est réalisée statistiquement selon plusieurs dispositifs afin d'améliorer l'efficacité de l'expérimentation. Dans le cadre de l'étude, il a été retenu le mode de **disposition en blocs aléatoires**. Cette méthode repose sur la probabilité de trouver moins de différence entre des parcelles rapprochées qu'entre des parcelles éloignées. Des groupes de parcelles contiguës dits blocs sont alors constitués. Chaque bloc comprend tous les traitements et il est réalisé autant de blocs que de répétitions, dans l'exemple de l'étude, il y a **4 blocs de 5 traitements**. Pour l'étude des parcelles de dimensions de 5 m* 5 m soit 25 m² ont été retenues car elles sont adaptées à un travail manuel du sol et correspondent à un nombre d'individus semés relativement important et suffisant pour une interprétation statistique des résultats. Le nombre de répétition de chaque traitement a été fixé à 4, car il apparaît qu'un nombre moindre biaiserai la précision de l'essai.

Les critères de choix pour sélectionner le terrain sont la proximité de la plate-forme de compostage, la non contamination du sol par d'autres fertilisants ou amendements depuis plusieurs années, l'homogénéisation du terrain au niveau des critères pédologiques et topographiques, une surface nécessaire pour mener les essais soit environ 2 000 m² minimum, la proximité d'un point d'eau et la sécurisation du terrain par une clôture afin d'assurer une protection contre les animaux. De plus, le terrain doit être représentatif des parcelles cultivées dans la région du site C afin que l'essai soit répétable chez les agriculteurs de la région. Les critères de choix des cultures expérimentales sont une culture exigeant peu d'eau, à cycle végétatif court inférieur à 4,5 mois. Une culture de pomme de terre est retenue.

Chaque culture reçoit cinq traitements différents: le traitement témoin (T) correspond à la culture ne recevant ni fertilisant, ni amendement d'aucune sorte; le traitement compost (C) la culture recevant comme seul fertilisant une dose de compost déterminée selon les besoins de la culture; le traitement Fertilisant (F) la culture recevra comme fertilisant une dose d'engrais en mélange avec du compost (50%-50%) complet couramment utilisé dans la région pour ce type de culture, selon les doses usuelles locales ; le traitement bouse (B): la culture recevant comme fertilisant une dose de bouse de vaches selon les doses usuelles régionales; le traitement mixte (M): la culture recevra comme

fertilisant un mélange équitable de compost et de bouse de vache. L'emplacement de chaque traitement au sein de chaque bloc se fait par tirage au sort, dont les résultats sont présentés Figure 44.

	1	2	3	4	5
Bloc 1	T	C	F	M	B
Bloc 2	F	T	B	C	M
Bloc 3	M	B	C	T	F
Bloc 4	C	M	T	B	F

T : sol, B : sol avec bouses, C : sol avec compost, F : sol avec un mélange engrais et compost, M : sol avec un mélange de compost et de bouses

Figure 44 : Schéma du dispositif expérimental des blocs aléatoires

Pour chaque traitement, dans chaque bloc de culture, seront suivis les critères suivants:

- le rendement des cultures (pomme de terre, haricots, maïs),
- l'état sanitaire des cultures,
- le taux de germination et de levée,
- le coût de revient de la culture: vente,
- les intrants,
- la qualité des produits : poids moyen, calibre, qualités intrinsèques,
- la pression des termites et celle des adventices sur la culture.

III.4. Résultats agronomique sur compost du site C

Seuls les résultats des essais agronomiques sur culture de pommes de terre sont présentés dans le Tableau 77.

Tableau 77 : Résultats des essais agronomiques

	Témoin	Compost	Compost + Engrais	Compost + bouses
Quantité T/ha	-	24,6	12,3 + 12,3	12,3 + 0,24
Rendement T/ha	6,6	10,9	13,8	16,1

Les résultats de cette expérimentation montrent que le compost seul améliore le rendement de production et qu'appliqué en mélange avec un engrais ou des bouses, son taux d'amélioration des cultures est augmenté d'un facteur 2. La connaissance de la dose à l'hectare à appliquer est donc également un indicateur du bon fonctionnement de la filière indispensable à prendre en compte bien que trop rarement analysée.

En conclusion, le concept d'indicateur est délicat pour refléter entièrement une situation, il ne peut fournir qu'une information partielle, qui devra être le cas échéant confrontée à d'autres sources d'informations. Un indicateur fournit une vue simplifiée de la réalité, censée refléter des phénomènes complexes et souvent diffus, c'est pourquoi l'utilisation d'une multitude d'indicateurs est préconisée afin de diminuer les divergences d'interprétation et de limiter la subjectivité.

Les dysfonctionnements de la collecte influent directement sur le fonctionnement du compostage d'ordures ménagères. Si la collecte est mal réalisée ou insuffisante, les performances du traitement des déchets sont directement touchées et réduites. La collecte, située en amont du traitement, influe donc directement sur les performances de l'usine de compostage. La capacité de vente du compost et donc de son utilisation, est également directement liée à la productivité de l'usine et à sa raison d'exister. Si un marché n'existe pas ou est mal dimensionné, il joue sur les ventes du compost, sur les stocks et par voie de conséquence sur le bon fonctionnement de l'usine. L'évaluation des performances d'une usine de compostage exige non seulement d'analyser le fonctionnement de l'usine mais également d'inclure l'ensemble de la filière compostage de la collecte à la valorisation.

Conclusion Générale

Cette étude consacrée à la filière compostage des déchets dans les P.E.D, a abouti à la conception et à la réalisation d'un guide méthodologique d'expertise pour appréhender les conditions optimales de réussite de cette filière et sa pérennité dans une optique de développement durable de l'environnement des P.E.D. En effet le compostage de déchets fermentescibles, fraction majoritaire des ordures ménagères dans ces pays, est une alternative intéressante à l'enfouissement des déchets, trop rarement réalisé avec un souci de protection de l'environnement. Ces décharges plus ou moins sauvages qui fleurissent aux abords des grandes villes sont une plaie non seulement pour l'esthétisme architectural des agglomérations qui n'en finissent plus de grandir, mais aussi une source de risques pour la santé publique. En outre, il est navrant de laisser se dégrader à l'air libre une grande quantité de matière organique qui compostée, pourrait en grande partie subvenir aux besoins de terres agricoles très sollicitées, en termes de rétention d'eau et de matières fertilisantes.

Cette méthodologie d'expertise envisage toutes les étapes de la filière de l'amont du site de compostage, la collecte des déchets, à l'aval, c'est-à-dire la valorisation agronomique du compost produit en fonction des débouchés potentiels, en passant par le procédé lui-même. La démarche qui a prévalu pour mettre au point cette méthodologie s'appuyait tout d'abord sur un listing détaillé des dysfonctionnements enregistrés sur les usines de compostage des P.E.D et identifiés au cours d'une analyse bibliographique la plus exhaustive possible, et également des difficultés inhérentes des différents systèmes de collecte ou des débouchés commerciaux du compost produit. Cette démarche reposait sur trois points essentiels :

- la compilation des informations indispensables sur la filière et sur son intégration dans la politique de gestion des déchets de la ville,
- le choix d'indicateurs (techniques, économiques et environnementaux) les plus pertinents pour une évaluation rigoureuse des conditions de réussite,
- la validation ou non de ces indicateurs sur sites industriels en fonctionnement.

Ainsi une première expérience d'expertise d'un site de compostage de déchets verts dans un pays industrialisé a contribué à vérifier le contenu et la forme des questionnaires qui sont envoyés aux exploitants et aux maîtres d'ouvrage et qui sont une première source d'informations précieuses pour identifier le procédé et ses insuffisances éventuelles. Elle a également permis d'optimiser l'approche relationnelle avec les maîtres d'ouvrage et avec les responsables d'exploitation. C'est une étape souvent négligée qui conditionne toutefois la réussite de cette filière en ce sens que cette évaluation quantitative et qualitative des procédés donnera aux maîtres d'ouvrage et aux industriels des clés pour le choix du système de traitement le plus adéquat dans des conditions locales spécifiques.

Une deuxième expérience d'expertise d'un site industriel de compostage de déchets urbains dans un pays en développement a apporté des informations complémentaires, compte tenu du caractère des déchets entrants. Pour cela d'autres indicateurs plus spécifiques ont été identifiés en plus de ceux

pratiqués pour les déchets verts. Cet ensemble d'indicateurs conditionne la réalisation des objectifs fixés au compostage des déchets urbains :

- la récupération maximale de la matière organique sous forme de compost,
- la récupération des matériaux recyclables,
- le suivi de la dégradation des déchets,
- le suivi des consommables (eau et énergie),
- la qualité du compost (chimique, micro biologique et agronomique).

De ces deux expériences, grandeur nature, d'expertise de sites industriels, un guide général a pu être tiré qui inclut également une méthode d'approche de validation de la collecte des déchets pour l'alimentation pérenne en déchets de l'usine en quantité et en qualité. Le volet valorisation agronomique réalisé parallèlement à cette étude mais par un autre groupe de chercheurs du laboratoire est aussi intégré à ce guide ; il donne les conditions de réussite de valorisation agricole du compost : besoins en fertilisants, qualité des sols, concurrence des produits chimiques classiques, doses appliquées et rendements de production pour des cultures locales.

Le nombre de sites expertisés était insuffisant pour tirer des conclusions techniques plus générales en particulier pour le choix du meilleur procédé pour des conditions locales particulières (climat humide ou sec, composition des déchets et mode de gestion privée ou publique) . Des difficultés inhérentes à ce type de sujet sur les déchets qui implique une démarche préalable auprès d'un nombre important d'acteurs souvent en conflit sur des objectifs essentiels, ont retardé la réalisation des expertises prévues de sites industriels situés dans d'autres continents et sous d'autres climats.

Néanmoins l'application de cette méthodologie sur site, a mis en avant les conditions opérationnelles de la réussite de la filière compostage des déchets urbains dans les P.E.D :

- une gestion durable de la collecte,
- une caractérisation en flux et en composition des déchets à composter,
- un procédé industriel économiquement et techniquement performant qui prenne en compte les données locales,
- un compost de qualité adapté à un marché local suffisamment important.

Il reste encore à l'appliquer sur d'autres usines, ce qui permettra d'en faire un outil méthodologique de gestion opérationnelle de la filière compostage

Références Bibliographiques

ABOULAM S. (2005). "Recherche d'une méthode d'analyse du fonctionnement des usines de tri-compostage des déchets ménagers. Fiabilité des bilans matière." Rennes, Institut National Polytechnique de Toulouse: 110.

ACERO-DUBAIL M.-C. (1995). "Collecte et traitement des déchets ménagers: des différents modes de gestion." *Journal des communes* 2: 43-45.

ADANI F., GENEVINI P.L. & TAMBONE F. (1995). "A new nindex of organic matter stability". *Compost Science & Utilization*, 3:23-37.

ADAS Consulting.Limited. (2005). "Assessment of options and requirments for stability and maturity testing of composts." *The Waste and Resources Action Programme*. March 2005.

ADEME (1993). "MODECOM: Méthode de caractérisation des ordures ménagères."61.

ADEME (1998). "Le compostage des déchets organiques des ménages en Allemagne - Etat de l'art et retours d'expérience." Paris, France.188.

ADEME (2001). "Déchets organiques - Essai agronomique de plein champ d'un compost de déchets verts (résultats 8e année d'expérimentation)." Paris, France.

ALOUÉIMINE S.O., MATEJKA G., ZURBRUGG C. & SIDI MOHAMED M.E.O. (2005) "Caractérisation des ordures ménagères a Nouakchott – Partie 1 : méthode d'échantillonnage" *Déchets - Sciences et Techniques – soumise*.

ALOUÉIMINE S.O., MATEJKA G., ZURBRUGG C. & SIDI MOHAMED M.E.O. (2005) "Caractérisation des ordures ménagères a Nouakchott – Partie 2 : Résultats en saison sèche et en saison humide" *Déchets - Sciences et Techniques – soumise*.

ANONYME (1998)." Le compostage des déchets verts" *Ademe & Creed*.

ANRED (1985). "Les déchets ménagers dans les agglomérations des pays en développement - Bilan de la consultation." Paris, France, ANRED. 20.

ANTIZAR-LADISLAO B., LOPEZ-REAL J. & BECK J. (2005). "In-vessel composting-bioremediation of aged coal tar soil: effect of température and soil/green waste amendement ratio." *Environment International* 31 (2): 173-178.

ARINOLA O.G. & ARINOLA A.M. (1995). "Solid waste in urban and rural areas of Ibadan, Nigieria : composition, treatment and public health concerns." *Compost Science & Utilization* 3 (3): 80-83.

ASOMANI-BOATENG R., HAIGHT M. & FUREDY C. (1996). "Community composting in west Africa." *Biocycle* 38 (01): 70-71.

ATKINSON C.F., JONES D.D. & GAUTHIER J.J. (1996). "Biodegradabilities and microbial activities during composting of municipal solid waste in bench-scale reactors". *Compost Science & Utilization*, 4, 4:14-23.

AVNIMELECH Y., BRUNER M., EZRONY I., SELA R. & KOCHBA M. (1996). "Stability indexes for municipal solid waste compost." *Compost Science & Utilization* 4 (2): 13-40.

- BAJON F., COULOMB I., GILLET R., GILOUX P., LACHAUD A. & VAN DE KERKHOVE J.M. (1994). "Le compostage des ordures ménagères." *Norvergies*. Juillet 1994. 37.
- BARI Q.H. & KOENIG A. (2001). "Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste." *Resources, Conservation and Recycling* 33: 93-111.
- BAUD I., GRAFAKOS S., HORDIJK M. & POST J. (2001). "Quality of life and alliances in solid waste management - Contributions to urban sustainable development." *Cities* 18 (1): 3-12.
- BEGNAUD B., BERGEY J.-L., LECONTE J., FOULLY B. & CADILLON M. (1990). "Solutions nationales au Maroc." *Le transformeur - "Le magazine de l'agence nationale pour la récupération et l'élimination des déchets"* 4: 20-21.
- BELEVI H. (2000) "Material flow analysis as a strategic planning tool for regional waste water and solid waste management." *SANDEC News*.
- BELLENOUE K. (1998). "Le compostage des déchets organiques des ménages en Allemagne - Etat de l'art et retours d'expérience". Ademe éditions, Paris, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, 188.
- BENANI (1987). "Bilan et perspectives d'une action à un niveau national, le cas du Maroc." dans "Gestion des déchets ménagers dans les pays en développement". 9-11 septembre 1987, Angers, France. 147-161.
- BERNACHE-PEREZ G., SANCHEZ-COLON S., GARMENDIA A.M., DEVILA-VILLARREAL A. & SANCHEZ-SALAZAR M.E. (2001). "Solid waste characterisation study in the Guadalajara Metropolitan zone, Mexico." *Waste Management & Research* 19: 413-424.
- BERNAL M.P., NAVARRO A.F., SANCHEZ-MONEDERO M.A., ROIG A. & CEGARRA J. (1998 a). "Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil." *Soil biology & biochemistry* 30 (3): 305-313.
- BERNAL M.P., PAREDES C., SANCHEZ-MONEDERO M.A. & CEGARRA J. (1998 b). "Maturity and stability parameters of compost prepared with a wide range of organic waste." *Bioresource Technology* 63: 91-99.
- BERTOLINI G. (1989). "Une ressource à valoriser : le secteur informel, le cas indonésien." programme interministériel Rexcoop. 44.
- BERTOLINO R. & LARDINOIS I. (1998). "Grass roots composting in urban centers." *Biocycle* 39 (06): 67-68.
- BETURE ENVIRONNEMENT (2001). "Projet Déchets urbains - Egypte." Paris, France 65.
- BIONET "Biological waste treatment in Europe - Technical and market development." In: [en ligne]. Disponible sur: www.bionet.net.
- BOULALA P.F. (2005). "Valorisation des déchets par compostage: Etat des lieux des niveaux de maturité de différents composts". Alexandrie, Egypte, Université de Senghor: 78.
- BREWER L.J. & SULLIVAN D.M. (2003). "Maturity and stability evaluation of composted yards trimmings." *Compost Science & Utilization* 11 (2): 96-112.

- BRINTON R.B. & EVANS E. (2004). "A novel Ex-situ test kit to assess microbial spoilage of grains by means of carbon-dioxide respiration capture." dans " International Quality Grains Conference Proceedings".
- BRINTON W.F. (2000). "Compost quality standards & guidelines: An International View." New York, USA, Wood End Research Laboratory. 44.
- BRINTON W.F. (2001). "How compost maturity affects plant and roots performance in container grown media." *Journal of biodynamics* 233: 22-27.
- C.C.Q.C (2001). "Compost maturity index." CALIFORNIA COMPOST QUALITY COUNCIL. 26.
- CADILLON M. (1987). "La réalité d'un marché du compost : le cas de Kinshasa (Zaïre)." dans " Gestion des déchets ménagers dans les pays en développement". 9-11 septembre 1987, Angers, France. 139-147.
- CANET R. & POMARES F. (1995). "Changes in physical, chemical and physicochemical parameters during the composting of municipal solid waste in two plants in Valencia." *Bioresource Technology* 51: 259-264.
- CHANGA C.M., WANG P., WATSON M.E., HOITINK H.A.J. & MICHEL F.C. (2003). "Assessment of the reliability of a commercial maturity test kit for composted manures." *Compost Science & Utilization* 11 (2): 125-143.
- CHEN Y. (2003). "Nuclear magnetic resonance, infra-red and pyrolysis: application of spectroscopic methodologies to maturity determination". *Compost Science & Utilization*, 11, 2:152-168.
- CHUNG S.S. & POON C.S. (1998). "A comparison of waste management in Guangzhou and Hong-Kong." *Resources, Conservation and Recycling* 22: 203-216.
- COINTREAU-LEVINE S. (1996). "Systèmes de gestion des déchets solides financièrement durables." dans " Déchets solides en milieu urbain d'Afrique de l'Ouest et Centrale - Vers une gestion durable". 14-16 février 1996, Abidjan, Côte d'Ivoire. 29-34.
- COLLIGNON B., TOURAD M.O., HEU D., ESTIENNE C., ABDELKADER B. et MOULAY ZEINE S.A.O. (2002). "Etude de définition et de faisabilité du projet de développement urbain dans les quartiers défavorisés de Nouadhibou - Phase 2 -." Commune de Nouadhibou, Mauritanie, Hydroconseil.
- COPPER B.J. "Stability (Biodegradability)." In: [en ligne]. Disponible sur: http://www.ecn.nl/docs/society/horizontal/hor7_stability.pdf. (Consultée en 2004).
- COUTY F., DEBORD J. & FREDON D. (1999). "Probabilités et Statistiques." Edition Dunod, Paris, p105, 120
- CRITTER S.A.M., FREITAS S.S. & AIROLDI C. (2004). "Comparaison of microbial activity in some Brazilian soils by microcalorimetric and respirometric methods." *Thermochemica Acta* 410: 35-46.
- DALZELL H.W., BIDDLESTONE A.J., GRAY K.R. et THURAIRAJAN K. (1988). "Aménagement du sol : production et usage du compost en milieu tropical et subtropical." Rome, FAO.165.
- DAMIEN A. (2004). "Guide du traitement des déchets, 3ème édition." Paris, France.431.
- DAMODARAN N., ROBINSON A., DAVID E. & KALAS-ADAMS N. (2003). "Urban solid waste generation and management in India." dans " Ninth International waste management and Landfill Symposium". 6-10 octobre 2003, Cagliari, Italy.

- DAS K.C., SMITH M.C., GATTIE D.K. & HALE BOOTHE D.D. (2002). "Stability and quality of municipal solid waste compost from landfill aerobic bioreduction process." *Advances in Environmental Research* 6: 401-409.
- DAYAL G., YADAV A., SINGH R.P. & UPADHYAY R. (1993). "Impact of climatic conditions and socio-economic status on solid waste characteristics : a case study." *The science of the Total Environment* 136: 143-153.
- DEIANA S., GESSA C., MANUNZA C., RAUSA R. & SEEBER R. (1190). "Analytical and spectroscopic characterization of humic acids extracted from sewage sludge, manure, and worm compost." *Soil science*, 150, 1:419-424.
- DELORAINÉ A., HEDREVILLE L. et ARTHUS C. (2002). "Étude bibliographique sur l'évaluation des risques liés aux bio-aérosols générés par le compostage des déchets." Angers, France, ADEME & CAREPS. Mars 2002. 163.
- DEPORTES I., BENOIT-GUYOT J.-L. & ZMIROU D. (1995). "Hazard to man and the environment posed by the use of waste urban compost: a review." *The science of the Total Environment* 172: 197-222.
- DIARRE A. et TOGOLA S. (1997). "Collecte des ordures ménagères à Bamako." Gouda, Hollande, WASTE. 32.
- DIAZ L.F. (1997). "Managing solid waste in marginal areas." *Biocycle* 38 (06): 52.
- DIOP O. et MAYSTRE L.-Y. (1989). "Méthodologie systématique multicritère appliquée à la gestion des déchets solides urbains de Dakar (Sénégal)." *T.S.M eau*: 187-191.
- DOETSCH P., CHERIF M., LINS B., SCHNEIDER M. (2002) « La station de compostage de la ville de Blida » Rapport de la coopération technique algero-allemand entre le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) et la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH - Programme Gestion de l'Environnement. Mars 2002. 63p.
- DOMEIZEL M., KHALIL A. & PRUDENT P. (2004). "UV spectroscopy : a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost." *Bioresource Technology* 94: 177-184.
- DULAC N. (2001). "The organic waste flow in integrated sustainable waste management." Gouda, Hollande, Waste.50.
- E.E.A.A (2000). "The national strategy for integrated municipal solid waste management - A frame work for action." Cairo, Egypt.
- E.E.A.A M.S.E.A. (2002). "The National Environmental Action Plan 2002/2007." Cairo, Egypt.
- EGGEN T. & VETHE O. (2001). "Stability indices for different composts." *Compost Science & Utilization* 9: 19-36.
- EL-FADEL M., BOU-ZEID E., CHAHINE W. & ALAYLI B. (2002). "Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content." *Waste Management* 22: 269-282.
- ENDA "Le traitement alternatif des déchets ménagers pour les petites et moyennes communes au Maroc."
- ERDIN E. (1999). "Recent experience on composting in the town Izmir of Turkey." dans " International conference on biological treatment of waste and the environnemen (ORBIT 99)". Weimar, Germany.

- EZZ A.E. (2003). "Growth of the environment market of Egypt - Profitable compliance, the carrot not Stick." *EnviroEgypt*: 14.
- F.C.Q.A.O (1994). "Methods book for the analysis of compost." *Kompost Information*. B. ed.
- FARDEAU J.C. (2000). "Estimation de la biodégradabilité des éléments nutritifs contenus dans les produits résiduels organiques." *Ingénieries EAT* 21: 15-28.
- FEHR M., DE CASTRO M.S.M.V. & CALCADO M.D.R. (2000). "A practical solution to the problem of household waste management in Brazil." *Resources, Conservation and Recycling* 30: 245-257.
- FOLLEA V., BRUNET F., BENRABIA N., BOURZAI M.P. et FAUCOMPRES P. (2001). "Revue comparative des modes de gestion des déchets urbains adoptés dans différents pays de la ZSP." *Agence française du Développement*. octobre 2001. 24.
- FORSTER J. C., ZECH W. & WÜRDINGER E. (1993). "Comparison of chemical and microbial methods for the characterization of the maturity of composts from contrasting sources." *Biol. Fertil. Soils*, 16:93-99.
- FRANCOIS V. (2004). "Détermination d'indicateurs d'accélération et de stabilisation de déchets ménagers enfouis. Etude de l'impact de la recirculation de lixiviats sur colonnes de déchets". *Laboratoire des Sciences de l'Eau et de l'Environnement*. Limoges, France, Faculté des Sciences et Techniques: 185.
- FRANCOU C. (2003). "Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - Recherche d'indicateurs pertinents". Paris, Grignon, Institut National de Recherche Agronomique.
- FUREDY C. (2000). "Cities in Portugal and Turkey set up composting facilities." *Biocycle* 41 (02): 82.
- GAGNON B., SIMARD R.R., ROBITAILLE R., GOULET M. & RIOUX R. (1997). "Effect of composts and inorganic fertilizers on spring wheat growth and N uptake". *Can. J. Soil. Sci.*, 77:487-495.
- GAMAGE W., VINCENT S. & OUTERBRIDGE T. (1999). "Low-tech composting on an Island." *Biocycle* 40 (04): 79-80.
- GARCIA A.J., ESTEBAN M.B., MARQUEZ M.C. & RAMOS P. (2005). "Biodegradable municipal solid waste: characterization and potential use as animal feedstuffs." *Waste Management in press*.
- GARCIA C., HERNANDEZ T., COSTA F. & PASCUAL J.A. (1992). "Phytotoxicity due to the agricultural use of urban wastes." *Germination experiments. J. Sci. Food Agric.*, 59:313-319.
- GNANIH V., DARA S. et GNANIH Y. (1997). "Recherche expérimentale : amélioration de la filière compostage au CTOM - Bénin." *Tohoué, Bénin, Centre de traitement des ordures ménagères CTOM / EMMAUS. Secrétariat d'état à la coopération française et à la francophonie. Ademe. 29 mars 1997. 25.*
- GNANIH V., DARA S. et GNANIH Y. (1998). "Recherche expérimentale : amélioration de la filière compostage au CTOM - EMMAÛS - Bénin." *Tohoué, Bénin, Centre de traitement des ordures ménagères. 30 juillet 1998. 15.*
- GODDEN B. (1986). "Les tests enzymatiques et chimiques de maturité des composts." *Compost Information* 22: 20-24.
- GONZALEZ DEL CARPIO C. (1998). "Composting has promising future in Mexico." *Biocycle* 39 (12): 76-77.

GOOTAS H.B. (1959) "Compostage et assainissement" OMS, Genève.209

GOYAL S., DHULL S.K. & KAPOOR K.K. (2005). "Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity." Bioresource Technology article in press.

GROSSMANN J. (2003) "Mesures d'urgences pour une remise à niveau de la station de compostage de Blida" Rapport de la coopération technique algero-allemand entre le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) et la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH - Programme Gestion de l'Environnement. Mars 2003. 56p.

GROSSMANN J. (2004) " Etude de commercialisation du compost urbain de Beni Mered " Rapport de la coopération technique algero-allemand entre le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) et la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH - Programme Gestion de l'Environnement. Mars 2004. 56p.

GUARALDO (1987). "Les conditions spécifiques d'adaptation pour l'approvisionnement d'un marché : le cas de Sao Paulo (Brésil)." dans " Gestion des déchets dans les pays en développement". 9-11 septembre 1987, Angers, France. 169-177.

HAFID N. (2002). "Etude du compost de l'UPAO, des refus de compostage et des anciens dépotoire d'ordures ménagères de la ville d'Agadir". Laboratoire de Chimie minérale et Appliquée et Génie des procédés. Agadir, Maroc, Université IBN ZOHR, Agadir.

HAFID N., EL HADEK M., LGUIRATI A. et BOUAMRANE A. (2002). "Evaluation d'une filière simplifiée de compostage des ordures ménagères." Déchets 25: 13--17.

HAMER G. (2003). "Solid waste treatment and disposal: effects on public health and environmental safety." Biotechnology Advances 22: 71-79.

HARADA Y., INOKO A., TADAKI M. & IZAWA T. (1981). "Maturing process of city refuse compost during piling." Soil Sci.Plant. Nutr., 27, 3:357-364.

HARADA Y., INOKO A., TADAKI M. & IZAWA T. (1981). "Maturing process of city refuse compost during piling". Soil Sci.Plant. Nutr., 27, 3:357-364.

HASSEN A., BELGUTH K., JEDIDI N., CHERIF A., CHERIF M. & BOUDABOUS A. (2001). "Microbial characterization during composting of municipal solid waste." Bioresource Technology 80: 217-225.

HAUG R.T. (1993). "The practical handbook of compost engineering." Boca Raton, Florida.717.

HELFRICH P., CHEFETZ B., HADAR Y., CHEN Y. & SCHNABL H. (1998). "A novel method for determining phytotoxicity in composts." Compost Science &Utilization, 6, 3:6-13.

HIRAI M.F., KATAYAMA A. & KUBOTA H. (1986). "Effect of compost maturity on plant growth." BioCycle, 27:58-61.

HOGG D., BARTH J., FAVOINO E., CENTEMERO M., CAIMI V., AMLINGER F., DEVLIEGHER W., BRINTON W.F. & ANTLER S. "Comparison of compost standards within the EU, North America and Australia." In: [en ligne].Disponible sur: www.wrap.org.uk. (Consultée en novembre 2004).

HOORNWEG D. & THOMAS L. (1999). "What a waste : Solid waste management in Asia." Washington D.C, The World Bank.

- HOORNWEG D., THOMAS L. & OTTEN L. (2000). "Composting and its applicability in developing countries." Washington DC, World Bank, Urban development division. 46.
- HOUOT S., FRANCOU C. et POITRENAUD M. (2003). "Les méthodes d'évaluation de la maturité des composts." dans " Les entretiens de L'environnement - Les déchets". 26-27 mars 2003, Pau, France. 4.
- HOUOT S., FRANCOU C., LINERES M. et LE VILLIO M. (2002). "Gestion de la maturité des composts : conséquence sur leur valeur amendante et la disponibilité de leur azote - première partie-." Echo MO 34: 3-4.
- HOUOT S., FRANCOU C., LINERES M. et LE VILLIO M. (2002). "Gestion de la maturité des composts : conséquence sur leur valeur amendante et la disponibilité de leur azote - seconde partie-." Echo MO 35: 3-4.
- HOUOT S., FRANCOU C., VERGE-LEVIEL C., MICHELIN J., BOURGEOIS S., LINERES M., MOREL P., PARNAUDEAU V., LE BISSONNAIS Y., DIGNAC M.-F., DUMAT C., CHEIBAR A. et POITRENAUD M. (2004). "Valeur agronomique et impacts environnementaux de composts d'origine urbaine: variation avec la nature du compost." Dossier de l'environnement de l'INRA 25: 107-124.
- HSU J.H. & LO S.L. (1999). "Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure." *Environmental pollution* 104: 189-196.
- HYUNG HONG J.I., MATSUDA J. & IKEUCHI Y. (1984). "Survey of rural compost practices in Korea." *Biocycle* 25 (03): 52-53.
- IANNOTTI D.A., GREBUS M.E., TOTH B.L., MADDEN L.V. & HOITINK A.J. (1994). "Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste." *J. Environ. Qual.*, 23:1177-1183.
- IGLESIAS-JIMENEZ E. & PEREZ-GARCIA V. (1989). "Evaluation of city refuse compost maturity: A review". *Biological Wastes*, 27:115-142.
- IGLESIAS-JIMENEZ E., PEREZ GARCIA V., ESPINO M. & HERNADEZ J.M. (1993). "City refuse compost as a phosphorus source to overcome the P-fixation capacity of sesquioxide-rich soils." *Plant and Soil*, 148:115-127.
- JEDIDI N., VAN CLEENPUT O. & M'HIRI A. (1995). "Quantification des processus de minéralisation et d'organisation de l'azote dans un sol en présence d'amendements organiques." *Can. J. of Soil Sci.*, 75:85-91.
- JOHANNESSEN L.M. & BOYER G. (1999). "Observations of solid waste landfills in developing countries : Africa, Asia and Latin America." Washington D.C, The World Bank. 47.
- JOHN N.M., ADEOYE G.O. & SRIDHAR M.K.C. (1996). "Compost pelletization eases end use in Nigeria." *Biocycle* 37 (06): 55-56.
- KALOGO Y. & VERSTRAETE W. (2002) "Technological Aspects of DESAR: Potentials of anaerobic treatment of domestic sewage under temperate climate conditions." dans "Decentralised Sanitation and Reuse: Concepts, systems and implementation" 2002 IWA Publishing.
- KANAT G., DEMIR A., OZKAYA B. & BILGILI M.S. (2003). "Operational optimization of Istanbul waste recovery and composting plant." dans " Ninth International Waste Manangement and Landfill Symposium". 6-10 october 2003, Cagliari, Italy.

- KAPETANIOS E.G, LOIZIDOU M. & VALKANAS G. (1993). "Compost production from greek domestic refuse." *Bioresource Technology*, 44:13-16.
- KATHIRVALE S., YUNUS M.N.M., SOPIAN K. & SAMSUDDIN A.H. (2003). "Energy potential from municipal solid waste in Malaysia." *Renewable Energy* 29: 559-567.
- KIRCHMANN H. & WIDEN P. (1994). "Separately collected organic household wastes". *Swedish J.agric. Res.*, 24:3-12.
- KITTELBERGER (1994). "Manuel d'information sur la gestion et l'élimination des déchets solides urbains." Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. Février 1994.
- KOPIEU G. (1996). "Grandes métropoles d'Afrique de l'Ouest - Abidjan." dans " Déchets solides en milieu urbain d'Afrique de l'Ouest et Centrale - Vers une gestion durable". 14-16 février 1996, Abidjan, Côte d'Ivoire. 54-58.
- KÖRNER I., BRAUKMEIER J., HERRENKLAGE J., LEIKAM K., RITZKOWSKI M., SCHLEGELMILCH M. & STEGMANN R. (2003). "Investigation and optimization of composting processes - test systems and practical examples." *Waste Management* 23: 17-26.
- KREITH F. (1994). "Handbook of Solid Waste Management". *Biocycle Journal of Composting & Organics Recycling*. 39: 80.
- LARSEN K.L. & MCCARTNEY D.M. (2000). "Effect of C:N ration on microbial activity and N retention in benchscale study using pulp and paper biosolids." *Compost Science & Utilization* 8 (2): 147-159.
- LASARIDI K.E. & STENTIFORD E.I. (1998). "A simple respirometric technique for assessing compost stability." *Water Research* 32 (12): 3717-3723.
- LECOMPT M. (1965). "L'expérimentation et les engrais: les bases de l'expérimentation et les modes de calcul statistique" *Bulletin des engrais*. 91.
- LIANG C., DAS K.C. & McCLENDON R.W. (2003). "The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a solids composting blend." *Bioresource Technology* 86: 131-137.
- LUCERO-RAMIREZ B. (2000). "The Effects of Time and Temperature on the Fate of Pathogens and Indicator Bacteria During Municipal Wastewater Sludge - Mesophilic Anaerobic Digestion, Air-Drying, and Composting". Austin, Texas (United-States), The University of Texas: 205.
- MARTENS J. (2005). "Indicator methods to evaluate the hygienic performance of industrial scale operating Biowaste Composting Plant." *Waste Management* article in press.
- MATEJKA G., DE LAS HERAS F., KLEIN A., PAQUETEAU F., BARBIER J. & KEKE A. (2001). "Composting of municipal solid waste in Labé (Guinea): Process optimisation and agronomic development." dans " Eight International Waste Management and Landfill Symposium". Cagliari, Italy. 451-457.
- MBULIGWE S.E. & KASSENKA G.R. (2004). "Feasibility and strategies for anaerobic digestion of solid waste for energy production in Dar es Salaam City, Tanzania." *Resources, Conservation and Recycling* 42: 183-203.

- MBULIGWE S.E., KASSENGA G.R., KASEVA M.E. & CHAGGU E.J. (2002). "Potential and constraints of composting domestic solid waste in developing countries : findings from a pilot study in Dar es Salaam." *Resources, Conservation and Recycling* 36: 45-59.
- MEDINA M. (1998). "Scavenger cooperatives in developing countries." *Biocycle* 39 (06): 70-72.
- MELIS P. & CASTALDI C. (2004). "Thermal analysis for evaluation of the organic matter evolution during municipal solid waste aerobic composting process." *Thermochimica Acta* 413: 209-214.
- MEOUN N. & LE CLERC F. (1999). "Identification des sources de métaux lourds dans les OM." Paris, Creed. 35.
- MIQUEL M. (2001). "Rapport sur les métaux lourds et leur effets sur l'environnement et la santé." Paris, Sénat. 365.
- MOHEE R. (2002). "Assessing the recovery potential of solid waste in Mauritius." *Resources, Conservation and Recycling* 36: 33-43.
- MOREL J.L. (1982). "L'évaluation de la maturité des composts urbains par une méthode colorimétrique." *Compost Information* 10: 2-4.
- MOREL J.L., GUCKERT A., NICOLARDOT B., BENISTANT D., CATROUX G. & GERMON J.C. (1986). "Etude de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques et de la stabilité biologique des ordures ménagères au cours du compostage". *Agronomie*, 6, 8:693-701.
- MORVAN B. (2000). "Méthode de caractérisation des déchets ménagers : analyse sur produit sec." *Déchets - Sciences et Techniques* 20: 9-11.
- MUSTIN M. (1987). "Le compost." Paris, France.954.
- NGNIKAM E. (2000). "Evaluation environnementale et économique de systèmes de gestion des déchets solides municipaux : analyse du cas de Yaoundé au Cameroun". LAEPSI. Lyon, INSA LYON: 314.
- NICOLARDOT B., GERMON J.C., CHAUSSOD R. et CATROUX G. (1982). "Une technique simple pour déterminer la maturité des composts urbains." *Compost Information* 10: 4-8.
- NISSIM I., SHOHAT T. & AMICHAÏ E. (2003). "From dumping to recovery solid waste management in Israel." dans " Ninth International waste management and Landfill Symposium". 6-10 october 2003, Cagliari, Italy.
- NKANA J.C.V., DEMEYER A. & VERLOO M.G. (1996). "Chemical fertility constraints in some acid soils of the tropical forest zone of central cameroon." *Med. Fac. Landbouwn Univ. Gent* 60 (1): 53-61.
- NOBLE R. & ROBERTS S.J. (2003). "A review of the literature on eradication of plant pathogens and nematodes during composting, diseases suppression and detection of plant pathogens in compost." *The Waste and Resources Action Programme (W.R.A.P)*. Novembre 2003. 42.
- NUNAN F. (2000). "Urban Organic Waste markets: responding to change in Hubli-Dharward, India". *Pergamon, Habitat International* 24: 347-360.
- O.E.C.D (1998). "Final guidance document for distinguishing waste from non-waste." Paris, France, Organisation de Coopération et de Développement Economique. 23-24 Avril 1998.

- O.N.E.M (2001). "Rapport sur l'Etat de l'Environnement du Maroc ". Chapitre IV: Déchets et Milieux humains". Observatoire National de l'Environnement au Maroc.
- OBIRIH-OPAREH N. & POST J. (2002). "Quality assessment of public and private modes of solid waste collection in Accra, Ghana." *Habitat International* 26: 95-112.
- OJEDA-BENITZ S., ARMIJO DE VEGA C. & RAMIREZ-BARRETO M.E. (2003). "Characterization and quantification of household solid waste in a Mexican city." *Resources, Conservation and Recycling* 39: 211-222.
- PASCUAL J.A., GARCIA C. & HERNANDEZ T. (1999). "Comparaison of fresh and composted organic waste in their efficacy for the improvement of arid soil quality." *Bioresource Technology* 68: 255-264.
- PEIREIRA-NETO J.T. (2001). "Controlled composting developing countries." *Biocycle* 42 (2): 2.
- PERLA M. (1997). "Community composting in developing countries." *Biocycle* 38 (06): 48-51.
- PFAMMATER R. & SCHERTENLEIB R. (1996). "Non gouvernemental refuse collection systems." *SANDEC News* 2.
- PIETRO M. & PAOLA C. (2004). "Thermal analysis for the evaluation of the organic matter evolution during municipal solid waste aerobic composting process." *Thermochimica Acta* 413: 209–214.
- POORNIMA D.G. & MANJULA N.R. (2001). "Community participation in waste management - Experience of pilot projet in Bangalore, India." *Gouda, Waste*. September. 27.
- PORLIER A. (2000). "Gestion des déchets solides au Vietnam." dans " Séminaire sur la gestion des déchets solides au Vietnam". 8-9 Mai 2000, Damang & Hô Chi Min Ville. 25.
- POST J. (1999). "The problems and potentials of privatising solid waste management in Kumasi, Ghana." *Habitat International* 23 (2): 201-215.
- PROVENZANO M.R., SENESI N. & PICCONE G. (1998). "Thermal and spectroscopic characterization of composts from municipal solid waste." *Compost Science & Utilization* 6 (3): 67-73.
- RANALLI G., BOTTURA G., TADDEI P., GARAVANI M., MARCHETTI R. & SORLINI C. (2001). "Composting of solid and sludge residue from agricultural and foods industries. Bioindicators of monitoring and compost maturity." *journal of environmental science and health* 36 A (4): 415-436.
- RAND T., HAUKOHL J. & MARXEN U. (2000). "Municipal Solid Waste Incineration - A decision Maker's Guide." Washington D.C, World Bank. 14.
- RICHARD T.L., HAMLERS H.V.E., VEEKEN A. & SILVA T. (2002). "Moisture relation ships in composting processes." *Compost Science & Utilization* 10 (4): 286-302.
- RIVERO C., CHIRENJE T., MA L.Q. & MARTINEZ G. (2004). "Influence of compost on soil organic matter quality under tropical conditions." *Geoderma* 123 (3-4): 355-361.
- ROUX J.-C. (1987). "La mise au point expérimentale d'un procédé adapté au contexte local : le cas de Louga (Sénégal)." dans " Gestion des déchets ménagers dans les pays en développement". 9-11 septembre 1987, Angers, France. 161-169.
- ROUX J.-C., PROUST F. et CLIN F. (1988). "Valorisation agricole des déchets ménagers de la ville de Louga (Sénégal)." dans " Colloque Interne ISTED". 20 - 22/ 09/1988, Lyon. 421 - 428.

- RYNK R. (2003). "The art in the science of composting." *Compost Science & Utilization*, 11, 2:94-95.
- RYST I. (2001). "Assessment of a decentralised composting scheme in Dhaka, Bangladesh Technical, operational, organisational and financial aspects." Zurich, Suisse, Sandec. 88.
- S.A.N.D.E.C E.A.W.A.G.-. "Feasibility of composting municipal solid waste in Dar es Salaam, Tanzani." In: [en ligne]. Disponible sur: (Consultée en 16/10/01).
- SADAKA S. & EL-TAWEEL A. (2003). "Effects of aeration and C:N Ratio on household waste composting in Egypt." *Compost Science & Utilization* 11 (1): 36-40.
- SAKULRAT J., YUEN S.T.S. & JOSEPH J.B. (2003). "Municipal solid waste management in Thailand: the current situation and possible short-term changes." dans " Ninth International waste management and Landfill Symposium". 6-10 October 2003, Cagliari, Italy.
- SANCHEZ-MONEDERO M.A., ROIG A., PAREDES C. & BERNAL M.P. (2001). "Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, Ec and maturity of the composting mixtures." *Bioresource Technology* 78: 301-308.
- SAVIOZZI A., LEVI-MINZI R. & RIFFALDI R. (1988). "Maturity evaluation of organic waste." *BioCycle*, 29:54-56.
- SCAGLIA B., TAMBONE F., LUIGI GENEVINI P. & ADANI F. (2000). "Respiration index determination: Dynamic and static approaches". *Compost Science & Utilization*, 8, 2:90-98.
- SENES CONSULTANTS LIMITED (1999). "Méthodologie recommandée pour la caractérisation des déchets dans le cadre des études d'analyse directe des déchets au Canada." Rapport préparé sous le comite de caractérisation des déchets du CCME. 64.
- SERRA-WITTLING C. (1995). "Valorisation de composts d'ordures ménagères en protection des cultures: Influence de l'apport de composts sur le développement des maladies d'origine tellurique et le comportement de pesticides dans un sol." Mémoire de thèse pour l'obtention du diplôme de docteur de l'INA-PG, 220p.
- SHAH R. (2000). "Indicateurs environnementaux." Munich, Allemagne, Nation Unies - Division statistique. 18-20 septembre 2000. 26 - 41.
- SHIN H.-S., HWANG E.-J. & GEE C.-S. (1997). "Food residuals management in Korea." *Biocycle* 38 (10): 69-71.
- SKORDILIS A. (2004). "Modelling of integrated solid waste management systems in an island." *Resources, Conservation and Recycling* 41: 243-254.
- SMARS S., GUSTAFSSON L., BECK-FRIIS B. & JONSSON H. (2002). "Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control." *Bioresource Technology* 84: 237-241.
- SOCLO H.H., AGUEWE M., ADJAHOSSOU B.C., HOUNGUE T. et AZONTONDE A.H. (1999). "Recherche de compost type et toxicité résiduelle au Bénin." *TSM* 9: 68-76.
- SOGREAH (2001). "Solid waste management study for Bangkok." Bangkok, Kingdom of Thailand, Bangkok Metropolitan Administration. May 2001.

- SOUMARE M., TACK F.M.G. & VERLOO M.G. (2003). "Effects of a municipal solid waste compost and mineral fertilization on plant growth in two tropical agricultural soils of Mali." *Bioresource Technology* 86: 15-20.
- SPOHN E. (1978). "Determination of compost maturity." *Compost Science / Land Utilization*: 26-27.
- STAHLSCHIMDT V. (1984). "Can composting compete with controlled tipping?" *Biocycle* 25 (03): 34-35.
- STENTIFORD E.I. (1996). "Diversity of composting system." In *Science and Engineering of Composting*, de Bertoldi et al. ed. (Blackie Academic and Professional, Bologne),95
- SUGAHARA K., HARADA Y. & INOKO A. (1979). "Color change of city refuse during composting process." *Soil Sci.Plant. Nutr.*, 25, 2:197-208.
- SUNDBERG C., SMARS S. & JONSSON H. (2004). "Low pH as an inhibiting factor in the transmission from mesophilic to thermophilic phase in composting." *Bioresource Technology* 95 (45-150).
- TAWEE S. & ISMAIL M. (2003). "Solid waste management in Malaysia: its problems and solution." dans "Ninth International Waste Management and Landfill Symposium". 6-10 octobre 2003, Cagliari, Italy.
- TCHOBANOGLIOUS G., THEISEN H. & VIGIL S. (1993). "Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues." McGraw Hill, New York.
- TEZANOU J., KOULIDIATI J., PROUST M., SOUGOTI M., GOUDEAU J.C., KAFANDO P. et ROGAUME T. (2001). "Caractérisation des déchets ménagers de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso)."
- THURGOOD M. (1998). "Decision-Maker's Guide to Solid Waste Landfills - Summary." Washington, DC, The World Bank, World Health Organization, Swiss Agency for Development and Cooperation, and Swiss Center for Development Cooperation in Technology and Management.
- TIQUIA S.M. & TAM N.F.Y. (1998). "Composting pig manure in Hong Kong." *Biocycle* 39 (02): 78-79.
- TULADHAR B. & BANIA A. (1998). "Operating a compost plant in the Himalayan Kingdom." *Biocycle* 39 (08): 79-83.
- TUOMELA M., VIKMAN M., HATAKKA A. & ITAVAARA M. (2000). "Biodegradation of lignin in a compost environment : a review." *Bioresource Technology* 72: 169-183.
- TYTECA D. (2002). "Problématique des indicateurs environnementaux et de développement durable." dans " Congrès SIM (Société de l'Industrie Minérale). Atelier 5 : "Le développement durable et ses indicateurs"". 8-11 octobre 2002S, Liège, Belgique. 15.
- USDA (2002). "Test methods for the examination of composting and compost."
- VAN BEUKERING P., SEHKER M., GERLAGH R. & KUMAR V. (1999). "Analysing urban solid waste in developing countries : a perspective on Bangalore, India." *Creed. Mars* 1999. 36.
- VAN DE KLUNDERT A. & ANSCHÜTZ J. (2001). "Integrated sustainable waste management - The concept." Gouda, Hollande, Waste.41.
- VENGLOVSKY J., SASAKOVA N., VARGOVA M., PACAJOVA Z., PLACHA I., PETROVSKY M. & HARICHOVA D. (2005). "Evolution of temperature and chemical parameters during composting of pig slurry solid fraction amended with natural zeolite." *Bioresource Technology* 96: 181-189.

W.E.R.L "Guide to Solvita(R) testing for composting maturity index." In: [en ligne].Disponible sur: www.woodsend.org. (Consultée en 2002).

W.E.R.L "Principles and Practice - Compost sampling for lab analysis." WOODS END RESEARCH LABORATORY.

W.E.R.L (2000). "Interpretation of waste & compost tests." *Journal of the Woods End Research Laboratory* 1 (4): 6.

W.R.A.P (2004). "Summary of the BSI specification for composted materials - Introduction to BSI PAS 100." *The Waste and Resources Action Programme (W.R.A.P)*.

WAAS E., ADJADEME N., BIDEAUX A., DERIAZ G., DIOP O., GUENE O., LAURENT F., MEYER W., PFAMMATTER R., SCHERTENLEIB R. et TOURE C. (1996). "Valorisation des déchets ménagers organiques dans les quartiers populaires des villes africaines." Genève, Suisse, SKAT.142.

WAHYONO S. & SAHWAN F.S. (2000). "Low-tech composting in tropical countries." *Biocycle* 41 (02): 78-79.

WANG P., CHANGA C.M., WATSON M.E., DICK W.A., CHEN Y. & HOITINK H.A.J. (2004). "Maturity indices for composted dairy and pig manures." *Soil biology & biochemistry* 36 (5): 767-776.

WEI Y.-S., FAN Y.-B., WANG M.-J. & WANG J.-S. (2000). "Composting and compost application in China." *Resources, Conservation and Recycling* 30: 277-300.

WEPPEN P. (2001). "Process calorimetry on composting of municipal organic wastes." *Biomass & bioenergy* 2&: 289-299.

WEPPEN P., GUDLADT U. & WILLERT A. (1998). "Die rottergradbestimmung von kompost in Dewar-gefässen- Eine kalorimetrische interpretation". *J.Thermal Anal.*, 52:81-91.

WICKER A. (2000). "Gestion des déchets." dans " *Statistiques pour la politique de l'environnement*". 27-28 novembre 2000, Munich.

WU L., MA L.Q. & MARTINEZ G.A. (2000). "Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost." *J. Environ. Qual.*, 29:424-429.

YEYE M.S. (2002). "Introduction." dans " *Séminaire - atelier francophone sur la gestion des déchets ménagers (Cahier-technique)*". 18-20 novembre 2002, Saaba-Ouagadougou, Burkina Faso. 17-25.

YOON-SEOK K., JONG-BU P., SUNG-SU C. & SEUNG-HO H. (1999). "Processing Food Residuals And Sawdust In Taejeon". *Biocycle Journal of Composting & Organics Recycling*, 40: 70-71.

ZBYTNIIEWSKI R. & BUSZEWSKI B. (2005). "Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: chemical and spectroscopic properties." *Bioresource Technology* 96: 471-478.

ZBYTNIIEWSKI R. & BUSZEWSKI B. (2005). "Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 2 : multivariate techniques in the study of compost maturation." *Bioresource Technology* 96: 479-484.

ZURBRUGG C. "Biological treatment of municipal solid waste." In: [en ligne].Disponible sur: (Consultée en 16/10/02).

ZURBRUGG C. & AHMED R. (1999). "Enhancing Community Motivation and Participation in Solid Waste Management." SANDEC News 4.

ZURBRUGG C. & ARISTANTI C. (1999). "Resource recovery in a primary collection scheme in Indonesia." SANDEC News (4): 7-10.

ZURBRUGG C. & DRESCHER S. (2002). "Solid waste management - Biological treatment of municipal solid waste." SANDEC News 5: 6-7.

ZURBRUGG C. & SCHERTENLEIB R. (1998). "Main problems and issues of solid waste – Management in Developing Countries with emphasis on problems related to disposal by landfill." Proceedings of the thirds Sweden research symposia of landfills. October 1998.

ZURBRUGG C. (2003). "Markets for compost - a key factor for success of urban composting schemes in developing countries." dans " ISWA congress". 9-13 November 2003, Melbourne Australia.

ZURBRUGG C., DRESCHER S., PATEL A.H. & SHARATCHANDRA H.C. (2003). "Taking a closer look at decentralised composting schemes - lessons from India." Asian Society for Environmental Protection (ASEP).

ZURBRUGG C., DRESCHER S., PATEL A.H. & SHARATCHANDRA H.C. (2004). "Decentralised composting of urban waste - an overview of community and private initiatives in India cities." Waste Management 24 (7): 655-662.

ZURBRUGG C., DRESCHER S., PATEL A.H., SHARATCHANDRA H.C. & HAYHURST R.D. (2003). "Decentralised composting solutions for Indian Cities." EAWAG, SANDEC. August 2003. 6.

ZURBRUGG C., DRESCHER S., RYTZ I., MAQSOOD SINHA A.H. & ENAYETULLAH I. (2005). "Decentralised composting in Bangladesh, a win-win situation for all stakeholders." Resources, Conservation and Recycling 43 (3): 281-292.

Site Internet :

www.ordif.fr

www.ademe.fr

www.oieau.fr

www.devdata.worldbank.org

www.ulg.ac.be

www.vincienvironnement.fr

Annexes

Annexe 1 : Questionnaires

Annexe 2 : Chronogramme de l'expertise expérimentale

Annexe 1

- sur le conditionnement : Oui Non

L'usine s'intègre-t-elle dans un plan global de valorisation des déchets : Oui Non

Ville(s) ou agglomération desservie

Nom de la ville ou agglomération desservie :

Nombre d'habitants : 1,3 millions d'habitants.

Standing des habitants (en fonction du revenu moyen) : Haut **Moyen** Faible

Politique de recyclage global de la ville : Oui **Non**

Quels déchets :

Recyclage en quoi :

Par qui :

Investissement politique

Quelle stratégie est mise en œuvre pour valoriser le compost :

Qui s'investit dans le programme de compostage : Pays Ville ONG ⁽¹⁾

Association Autres :

Par quels moyens : Financier Matériels Humains Autres :

Sensibilisation auprès des riverains : **Oui** Non

Comment :

Sensibilisation auprès des utilisateurs : **Oui** Non

Comment :

(1) ONG : organisation non gouvernementale

Production de déchets ménagers

Type de déchets générés :

Par qui :

En quelle quantité :

La production de déchets dépend-elle des saisons : Oui Non

Quel type de déchets est utilisé et à quelle fin :.....

.....

% de chacun :.....

A quel prix :.....

Perspectives des utilisateurs :.....

Débouchées

Type de valorisation : **Traitement des sols** Assainissement microbiologie des sols Revégétation Remblai Autres :.....

Type de culture agricole :

Existence d'une collaboration commerciale : Oui Non, avec qui :.....

Existence d'un marché: **Oui** Non, pourquoi :.....

Le compost est-il fréquemment employé : **Oui** Non

Utilisation : **Agriculture** Parc municipaux T.P⁽²⁾ Fermes

Autres :.....

Par qui : Municipalité Industries **Marché agricole** Coopérative
Particuliers Autres :.....

En quelle quantité :.....

Préférence des acheteurs pour :

- le conditionnement en : **Vrac** Sac

- la granulométrie (mm) : **55 mm, 30 mm ou 14 sur demande**.....

- le volume des sacs (m³) :.....

Le compost est-il vendu : **Oui** Non

Prix en fonction du poids :.....

Prix en fonction du volume :.....

(2) TP : travaux publics

Produits concurrentiels

Type de produits :.....

Utilisation :.....

Par qui :.....

En quelle quantité :.....

A quel prix :.....

Raison de ce choix :.....

Exploitation

Liste des activités sur le site : centre de transit, ancienne décharge, compostage.....

But de la construction de l'usine : Elimination des déchets Valorisation des déchets

Fabrication d'amendements organiques Autres :.....

Année de construction : **1996**

Année de mise en service : **1996**

Nom du constructeur : Entreprise nationale

Nom du propriétaire : municipalité

Nom du financier :.....

Mode de gestion : Directe Déléguée Autres :.....

Gestionnaire : Mairie ONG PME⁽³⁾

Autres :.....

Financier : Mairie ONG PME Autres :.....

Investissement de départ :.....

Coût de

fonctionnement :.....

(3) P.M.E. : petites et moyennes entreprises

Lieu d'implantation

Situation géographique : Cœur de la ville Périphérie Pleine campagne

Autres :.....

Nom de la ville et / ou du quartier :.....

Nombre de villages aux alentours :.....

Nom et distance d'éloignement (m) des villages alentours :.....

.....

Présence de rivières à proximité : **Oui** * Non

* si oui, nom et distance (m) :.....

Présence de la nappe phréatique à proximité : Oui * Non

* si oui, profondeur (m) :.....

Présence d'un captage d'eau souterraine : Oui Non

Nature du sol et du sous-sol :.....

Personnel de la plate-forme

Nombre total d'employés :.....

Fonctions	Nombre	Salaire moyen
-----------	--------	---------------

.....

.....

.....

.....

.....

Formation du personnel : Très fréquente Fréquente Rare Inexistante

Collecte et Transport

Type de déchets collectés **Ordures ménagères** Biodéchets Autres

Type de collecte : **P.A.P⁽⁴⁾** A.V⁽⁵⁾ Précollecte + collecte par camions

Sélective Autres :.....

Fréquence de collecte (été) **Journalière** Hebdomadaire Autres

Fréquence de collecte normale : **Journalière** Hebdomadaire Autres

Existence d'un pré-tri pour la fraction fermentescible : **Oui** Non (*oui sur site*)

Existence d'un contenant : Oui Non ; nature et volume :.....

Collecteur : Services municipaux **Privé*** Autres :.....

*Si Privé : Nom et coordonnées

.....

Temps estimé entre la production des déchets et leurs arrivées au site : **1 jours**

Type de véhicule de transport : camions spécialisés, compacteurs parfois

Volume des véhicules (m³) : **de 7 à 23 m³**

Accès à la plate-forme : **Goudronnée** **Terre battue** Absence de route

Autres :.....

Panneau d'indication de la plate-forme : **Oui** Non

Système d'évaluation de la masse entrant : Non **Oui, lequel : pont bascule**

(4) P.A.P :porte à porte

(5) A.V : apport volontaire

Législatifs

Existence de réglementation sur :

le fonctionnement de l'usine : Oui Non, lesquels

les pollutions liées à l'usine : Oui Non, lesquels

la composition du compost : **Oui** Non, lesquels

la valorisation du compost : Oui Non, lesquels

autres : Oui Non, lesquels

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Préambule à l'audit d'une unité de compostage

Fiche n°.....

Date.....

Auditeur

Responsable d'exploitation

Nom..... Nom.....

Fonction..... Fonction.....

Visa..... Visa.....

Personnes à rencontrer

Nom	Fonction	Points audités
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Documentations à fournir (non exhaustif)

- Etude d'impact
- Plan d'occupation des sols
- Plan du site et synoptique du procédé
- Factures des engins, des carburants et de l'entretien
- Dossiers administratifs : arrêté préfectoral

Résultats d'analyses :

Caractérisation

Lixiviats

Études sonores

Matière sèche et humidité

pH

Rapport C/N

Matière organique

Matière organique synthétique/et non synthétique

Azote

Métaux lourds

Valeurs agronomiques

Norme de rejet

Suivi des équipements, des andains

IDENTIFICATION DES DECHETS

Origine des déchets ménagers et urbains

Nombre de personnes concernées : **3 millions**

(Année du recensement.....)

Nombre de quartiers concernés : **18 districts**

Noms de ces quartiers :

Production de déchets (kg/hab./jour) :

La zone regroupe-t-elle des:

1) **marchés**

- nombre de marchés par semaine : inconnu

2) **industries et artisanats**

- nature des industries et artisanats : inconnu

Proportion des déchets arrivant à la plate-forme en %

	Indépendance des saisons	Période sèche	Période humide
ménages	85%		
industries et artisanats	5%		
marchés	10%		

Caractéristiques des déchets bruts reçus sur la plate-forme

Aspect des déchets à réception : trié **mélangé** fermentation amorcée

autres :

Nombre de caractérisations déjà effectuées : **18 caractérisations (2 par mois en visuel)**

Quelle période : sèche humide **indépendante**

	Composition en %	Poids en T		Volume m ³	
		période sèche	période humide	période sèche	période humide
Putrescibles					
Inertes	0,06	13			
Plastiques	0,06	13,4			
Verres	0,06	14,6			
Papiers / cartons	0,09	21			
Métaux	0,2	53			
Textiles	0,06	13			
Autres					

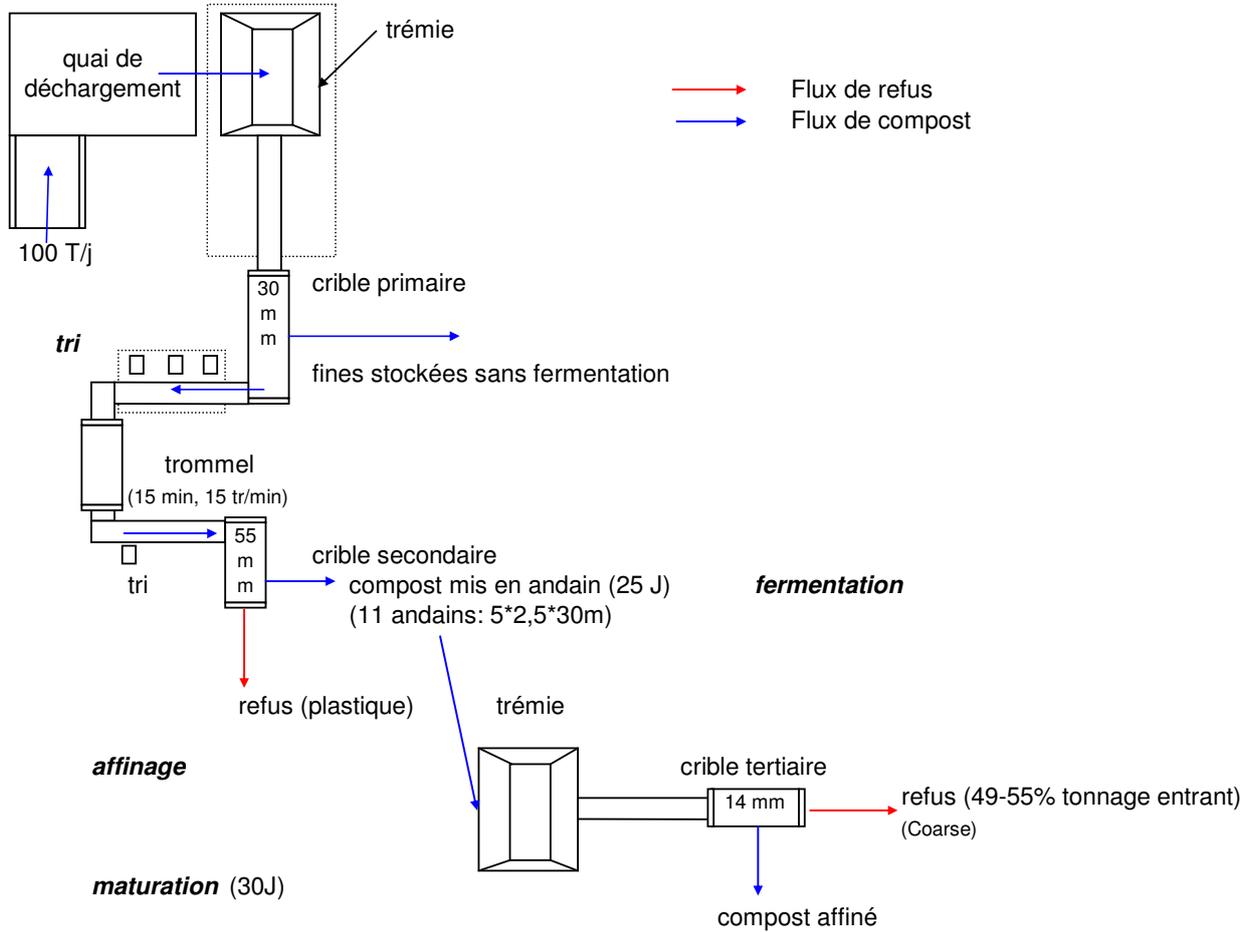
Remarque : Chiffres de 2002

PARTIE 1 : PROCÉDE

Ordre chronologique des techniques intervenant sur la plate-forme : /1/5/3/4/6 si nécessaire

- 0) phase préliminaire de séchage 1) tri 2) broyage 3) fermentation 4) maturation
 5) criblage 6) tamisage 7) autres :

Synoptique du procédé (à fournir ou représenter)



Plan d'exploitation (à fournir ou représenter)



I / TRI

Rendement massique

Flux de déchets - entrant [.....] en tonnes / jour
 - sortant [.....] en tonnes / jour
 - refus [.....] en tonnes / jour

Procédé

- Manuel

nombre de personnes : **15**

durée du travail/jour/personne : **6 heures /jour/personne**

- Mécanique

type de machine : tapis de tri classique

année achat :.....

Investissement : municipalité

Coût

Coût transport des refus :.....

Source d'énergie :.....

Consommation de carburant ou d'électricité :.....

Coût du tri des déchets bruts/ tonne :.....

Refus

Nature : plastiques inertes verres papiers/cartons métaux textiles
 autres :.....

II / BROYAGE

Rendement massique

Flux de déchets - entrant [.....] en tonnes / jour
 - sortant [.....] en tonnes / jour
 - refus [.....] en tonnes / jour

Procédé

- Manuel

outils utilisés : serpette hache autres :.....

nombre d'ouvriers :.....

durée du travail par jour :.....

- Mécanique

type de machine :.....

date achat :.....

Investissement :.....

Coût

Source d'énergie :.....

Consommation de carburant ou d'électricité :.....

Coût du broyage des déchets bruts / tonne :

Refus

Devenir : décharge recyclage en début de cycle incinération autres :

III / HOMOGENEISATION

Existence d'une étape spécifique d'homogénéisation : oui non

Si non, quel procédé sert d'homogénéisation : tri broyage retournement
tamisage autres....

Coût global de l'homogénéisation / tonne :

IV / FERMENTATION

IV.1. ANDAINS

Procédé

Forme : triangulaire trapézoïdale tabulaires autres :

Dimensions : 5m*2,5m*30m

Flux de déchets : - entrant [.....] en tonnes / jour
- sortant [.....] en tonnes / jour

Constitution des andains : au fur et à mesure en plusieurs phases après stockage
autres :

Fréquence de réalisation des andains : [] fois par jour [] fois par semaine [] fois par mois autres :

- Manuel

outils utilisés : pelle râteau seau autres :

nombre de personnes :

durée du travail par jour :

- Mécanique

type de machine : **tracteur agricole + benne basculante latérale**

année achat :

investissement : Municipalité

Durée de la fermentation : [25] jours

Couverture des tas : oui * non

* si oui, par quoi : bâche feuilles autres :

Aération

a) Retournement

- Manuel

outils utilisés : pelle râteau autres :

nombre d'ouvriers :

durée du travail par jour :

- Mécanique

type de machine : **Chargeur Caterpillar®**

Année d'achat :

Investissement : 150 000 €

Capacité maximale de l'engin : [.....] en tonnes / jour

Fréquence d'aération : [1] fois la 1^{ère} semaine [] fois la 2^{ème} semaine [3] fois la 2^{ème} quinzaine [6 à 8] fois par mois autres :

b) Aération passive (RQ : étude en cours)

Matériels utilisés : bambous végétaux métallique plastique autres :

Type d'aération : continue discontinue

Débit d'air (minutes) :

Investissement :

c) Aération forcée

Matériels utilisés : métallique plastique autres :

Type d'aération : continue discontinue

Débit d'air (minutes) :

Investissement :

Humidification

- Manuelle

outils utilisés : arrosoir tuyau d'arrosage autres :

nombre d'ouvriers :

durée du travail par jour :

- Automatisée

type d'humidification : aspersion immersion autres :

technologie : au sol aérien au sol et aérien autres :

investissement :

Coût global de la fermentation :

IV.2. COMPOST EN TUNNEL OU EN COULOIRS

Procédé

Dimensions :

Flux de déchets

- entrant [.....] en tonnes / jour

- sortant [.....] en tonnes / jour

Fréquence de remplissage: [] fois par jour [] fois par semaine [] fois par mois autres :

Le remplissage se fait : au fur et à mesure en plusieurs phases après stockage
 autres :

Durée de la fermentation : [.....] jours

Investissement :

Aération

Matériel utilisé :

Type d'aération : continue discontinue

Débit d'air (minutes) :

Investissement :

Humidification

Type de technologie : au sol aérien au sol et aérien autres :

Investissement :

IV.3. COMPOST EN TOUR OU BIOREACTEUR

Procédé

Dimensions :

Flux de déchets

- entrant [] en tonnes/jour

- sortant [] en tonnes/jour

Fréquence de remplissage du réacteur : [] fois par jour [] fois par semaine [] fois par mois autres :

Fonctionnement : en continu en batch

Année achat :

Durée de la fermentation : [] jours

Investissement :

Aération forcée

Matériels utilisés: bambous végétaux métallique plastique autres :

Type d'aération : continue discontinue

Débit d'air (minutes) :

Investissement :

Humidification

Type de technologie : au sol aérien au sol et aérien autres :

Année achat :

Investissement :

V. AFFINAGE (à la demande)

Criblage successif : oui non

Taille de la ou des maille(s) :

Flux de déchets

- entrant [.....] en tonnes / jour
- sortant [.....] en tonnes / jour
- refus [.....] en tonnes / jour

- Manuel :

outils utilisé :.....
nombre d'ouvriers :.....
durée du travail par jour :.....

- Mécanique :

type de machine : **Crible rotatif de maille 14 mm**

forme de la maille : ronde carrée triangle

année achat :.....

Investissement : Municipalité

Coût global de l'affinage / tonne :.....

VI. MATURATION

Lieu de maturation : **sur place**

Durée : **30 jours. Après fermentation**

Couverture : oui non ; de quel type.....

Coût de la maturation / tonne :.....

Stockage

Lieu : sur le site à l'extérieur

Le lieu est-il : ouvert fermé *

* si fermé, par quoi : hangar en béton case en végétaux autres :.....

durée moyenne du stockage en jour :.....

Dimensions : **150m*40m**

Capacité de stockage maximum : [.....] en tonnes/jour

Coût du stockage :.....

Conditionnement (étude en cours)

sur le site à l'extérieur :.....

- Manuel : oui non

nombre d'ouvriers :

durée du travail par jour :.....

- Mécanique :

type de machine :.....

Année achat :.....

Contenance des sacs en m³ :.....

Coût du conditionnement / tonne :.....

PARTIE 2 : SUIVI ET CONTROLE

I / CONTROLE

Déchets bruts

Fréquence du contrôle : [] fois par jour [1] fois par semaine [] fois par mois autres

.....

Paramètre de contrôle : flux volume qualité de déchets humidité matières organiques rapport C/N autres :

Par qui : laboratoire indépendant* personnel sur site autres :

Compost produit

Fréquence du contrôle : [] fois par jour [2] fois par semaine [8] fois par mois autres

.....

Paramètre de contrôle : flux volume qualité du compost humidité matières organiques rapport C/N autres : pH, température, métaux (Pb, Zn, Cd, Ni).....

Par qui : laboratoire indépendant* personnel sur site autres :

Coût global des contrôles :

II / SUIVI DES PARAMETRES

Granulométrie

Lieu de prélèvement :

Quantité prélevée :

Fréquence: [] fois par jour [] fois par semaine [] fois par mois

autres :

Technique utilisée : trommel table densimétrique autres :

Investissement :

Aération

Lieu de mesure :

Fréquence du suivi d'aération : [] fois par jour [] fois par semaine [] fois par mois

autres :

Technique utilisée pour le suivi de l'oxygène :

Investissement :

Humidité

Présence d'un pluviomètre: oui non

Arrosage : oui non

Provenance de l'eau utilisée : rivièrerecyclage juseau pluviale eau de forage autres :

Fréquence d'arrosage : *indépendamment*

- en période sèche : [] fois par jour [1] fois par semaine [] fois par mois autres

.....

- en période **humide** : [] fois par jour [] fois par semaine [] fois par mois
 autres :
Quantité d'eau apportée : en saison sèche [.....] m³/jour
en saison humide [.....] m³/jour
Technique utilisée pour le suivi : sonde matières sèches (MS) appréciation tactile
autres :
Investissement :

Température

Relevé des températures extérieures : moyenne minimale maximale
Fréquence des relevés températures :
Lieu des mesures :
Fréquence du suivi : [] fois par jour [**1**] fois par semaine [] fois par mois autres
.....
Technique utilisée pour le suivi : sonde thermomètre autres :
Investissement :

pH

Fréquence du suivi : [] fois par jour [] fois par semaine [] fois par mois
autres : **sur compost**
Technique utilisée : pH mètre.
Investissement ou coût d'analyse :

Rapport C/N

Lieu de prélèvement : Laboratoire extérieur.
Fréquence du suivi : [] fois par jour [] fois par semaine [] fois par mois
autres : **sur compost**
Matières organiques méthode utilisée : **oxydation au bichromate.**
Carbone méthode utilisée : **oxydation au bichromate.**
Azote méthode utilisée : **méthode kjeldhal**
Investissement ou coût d'analyse :

Métaux lourds

Lieu de mesure : laboratoire extérieur
Fréquence du suivi d'aération : [] fois par jour [] fois par semaine [] fois par mois
autres : **sur compost**
Technique utilisée : **minéralisation + dosage Absorption Atomique flamme**
Réalisée par qui :
Investissement ou coût d'analyse :
Coût global des suivis :

PARTIE 3 : DEBOUCHES ET IMPACTS

I / VALORISATION

Valorisation dans : traitement des sols et des substrats assainissement microbiologie des sols
 revégétation remblai autres :

La qualité du compost varie-t-elle en fonction des saisons : oui non

Production (tonnes/an) : **1000 T/an (2002)**.

Acheteur	Lieu	Transport	Utilisation	Quantité (tonne)	Prix / m ³

II / IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Lixiviats

Existence d'un système de récupération des lixiviats : oui non

Fréquence du suivi :

Devenir des lixiviats : station d'épuration lagunage recycler pour arroser les andains milieu naturel sans traitement autres :

Quantités recueillies : [0] tonne par jour et / ou [] m³ par jour

Odeurs et indésirables

La population se plaint-elle des odeurs : jamais rarement habituellement

Présence d'odeurs nauséabonde sur le site : oui non

Présence d'indésirables : oui non

*si oui, lesquels : insectes rats serpents autres :

Annexe 2

Chronogramme de l'expertise expérimentale

	Actions	Besoin personnel/tps
*Jour 1	- Réunion informative avec les dirigeants du site - Visite détaillée du site & du laboratoire	
Jour 2	- Vérification des moyens mis à disposition Personnel Matériel Laboratoire sur place Recherche de solutions	
Jour 3	- Visite du laboratoire extérieur Vérification des analyses réalisées Recherche de solutions	
Jour 4	- Formation du personnel (prélèvements, caractérisation, tri manuel, volume)	- 6 pers. ⇨ 3H
Jour 5 <i>Jour de référence</i>	- Bilan pondéral DB MT RC - Densité DB DT RC DC - Echantillonnage DB MT RC DC	- 2 pers. ⇨ 3H - 2 pers. ⇨ 1H - 6 pers. ⇨ 6H
Jour 6	- Caractérisation sur humide DB - Echantillonnage pour laboratoire de chaque fraction	- 3 pers. ⇨ 6H - 2 pers. ⇨ 1H
Jour 7	- Caractérisation sur humide DT - Echantillonnage DT pour laboratoire - Analyse laboratoire DB humide	- 3 pers. ⇨ 6H - 2 pers. ⇨ 1H - 1 pers. ⇨ 3H
Jour 8	- Caractérisation sur humide RC - Echantillonnage RC pour laboratoire - Analyse laboratoire DT	- 3 pers. ⇨ 6H - 2 pers. ⇨ 1H - 1 pers. ⇨ 3H
Jour 9	- Caractérisation sur sec DB - Echantillonnage DB pour laboratoire - Analyse laboratoire RC	- 3 pers. ⇨ 6H - 2 pers. ⇨ 1H - 1 pers. ⇨ 3H
Jour 10	- Caractérisation sur humide DC - Echantillonnage DC pour laboratoire - Analyse laboratoire DB sec	- 3 pers. ⇨ 6H - 2 pers. ⇨ 1H - 1 pers. ⇨ 3H
Jour 11	- Analyse laboratoire DB sec - Envoi des échantillons pour sous-traitance	- 1 pers. ⇨ 3H

	- Suivi des andains en fermentation (T, H%, MO%, pH) - Réunion explicative pour la suite de l'expertise « indirecte » avec les exploitants et les personnes concernées	- 1 pers. ⇨ 1H - 4 pers. ⇨ 2H
Jour 12	- Essai d'optimisation du tri - Suivi des andains en fermentation	- trieurs ⇨ 4H - 1 pers. ⇨ 2H
Jour 13	- Essai d'optimisation du crible - Suivi des andains en fermentation (- 2 pers. ⇨ 4H - 1 pers. ⇨ 1H
Jour 14	- Récupération des données pour la reconstruction du coût de production - Suivi des andains en fermentation	
Jour 15	- Réception des analyses sous-traitées - Regroupement & analyses des données - Suivi des andains en fermentation	
Jour 16	- Matinée tampon (retard ou imprévu) - Suivi des andains en fermentation	- 3 pers. ⇨ 4H
Jour 17	- Echantillonnage sur humide DA (J+12) - Analyse laboratoire DA - Regroupement et traitement des données - Rapport provisoire - Réunion bilan	- 2 pers. ⇨ 2H - 1 pers. ⇨ 1H

* le décompte des jours est effectué en jours ouvrables.

	<i>Actions en dehors de l'expertise*</i>	Besoin personnel/tps
Jour 30	- Bilan pondéral DF CC CF - Densité DF CC CF - Echantillonnage DF CC CF	- 2 pers. ⇨ 3H - 2 pers. ⇨ 1H - 3 pers. ⇨ 6H
Jour 31	- Caractérisation sur sec DF - Echantillonnage DF pour laboratoire	- 3 pers. ⇨ 6H - 2 pers. ⇨ 1H
Jour 32	- Caractérisation sur sec CC & CF - Echantillonnage CC & CF pour laboratoire - Analyse laboratoire DF, CC & CF	- 3 pers. ⇨ 6H - 2 pers. ⇨ 1H - 1 pers. ⇨ 4H
Jour 33	- Envoi des résultats	

* Le suivi des andains (T, H%, MO%, pH) se fait en continue tout le long de la fermentation

Résumé

Cette étude a abouti à la conception d'un guide méthodologique d'expertise de la filière compostage des déchets urbains dans les pays en développement (P.E.D) pour appréhender les conditions optimales de réussite de cette filière et de sa pérennité.

Cette méthodologie d'expertise envisage toutes les étapes de la filière de la collecte des déchets, à la valorisation agronomique du compost. La démarche s'appuie tout d'abord sur un listing détaillé des dysfonctionnements enregistrés sur les usines de compostage des P.E.D. Ainsi une première expérience d'expertise d'un site de compostage de déchets verts dans un pays industrialisé a contribué à vérifier la logique de la démarche. Une deuxième expérience de compostage industriel de déchets ménagers dans un P.E.D a permis d'identifier des indicateurs conditionnant la production de compost. De ces deux expériences, grandeur nature, un guide général a pu être tiré incluant également une méthode d'approche de validation de la collecte des déchets et un volet sur la valorisation agronomique du compost produit.

This study led to the design of a methodological expertise guide on urban waste composting in the developing countries to optimise the success conditions of this activity and its durability.

This methodology includes all the step of the management from the waste collection to the agronomic compost valorisation and is based of a detailed dysfunctions listing. The first composting expertise of an industrial green waste contributed to check the methodological logic. A second industrial urban waste composting plant in developing countries made it possible to identify indicators who condition the compost production. Of these two experiments, a general guide could be elaborated including a collection waste validation and an agronomic compost valorisation.

Mots Clés

Compostage, déchets urbains, méthodologie d'expertise, pays en développement

Composting, urban waste, expertise methodology, developing countries